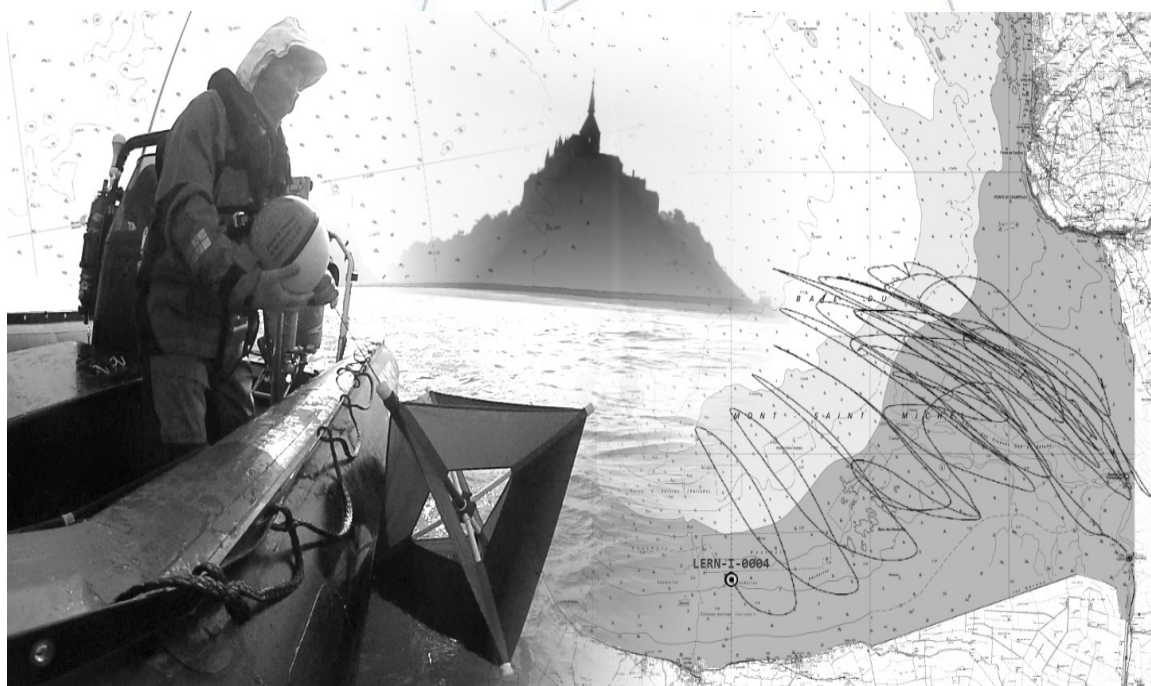


# RÉSUMÉ

Etude dans le cadre de la REvision de la Stratégie de sURveillance des Masses d'Eau côtières du Réseau Hydrologique Littoral Normand





## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport : Etude dans le cadre de la révision de la stratégie de surveillance des masses d'eau côtières du Réseau Hydrologique Littoral Normand</b>	
<b>Référence interne :</b> R.ODE/UL/LERN 20-09	<b>Date de publication :</b> 2020/07/28
<b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	<b>Version :</b> 1.0.0  <b>Référence de l’illustration de couverture</b> Simon B (2018)  <b>Langue(s) :</b> Français
<b>Résumé/ Abstract :</b> L’étude RESUME constituait une suite logique aux différents travaux de modélisation menés par le LER/N, que ce soit en 2005 pour la définition de la stratégie de surveillance pérenne du RHLN dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l’Eau (DCE), ou en 2015 pour la révision de cette stratégie pour le programme 2016-2021. Ce travail a permis de réaliser 27 lâchers de bouées sur 13 masses d’eau côtières ou de transition du littoral normand, qui ont totalisé 157 jours de dérive et près de 7 000 km de distance parcourue. Après une étape préliminaire de calibration du modèle NORM (MARS-3D), les trajectoires réelles des bouées ont été comparées avec des simulations de traceurs particuliers lâchés dans les mêmes conditions de forçage que les bouées. Enfin, des simulations de traceurs dissous à l’échelle des masses d’eau et à partir des points actuels de suivi du RHLN ont permis d’obtenir des cartes des temps de résidence, et l’évolution temporelle de la concentration de ces traceurs. Cette étude a permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique du littoral normand, et pourra être complétée par une étude statistique des données <i>in situ</i> sur les points RHLN afin de finaliser la réflexion sur leur représentativité.	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Littoral normand ; Directive cadre sur l’eau (DCE) ; Masse d’eau côtière ; Hydrodynamique ; Bouée dérivante ; Modèle MARS-3D ; Simulations ; Temps de résidence.	
<b>Comment citer ce document :</b> Menet-Nédélec F, Maheux F, Simon B, Riou P (2020). Etude dans le cadre de la révision de la stratégie de surveillance des masses d’eau côtières du Réseau Hydrologique Littoral Normand - RESUME. Rapport Ifremer R.ODE/UL/LERN 20-09, 88 p.	
<b>Disponibilité des données de la recherche :</b>	
<b>DOI :</b>	

<b>Commanditaire du rapport : Agence de l'Eau Seine-Normandie</b>	
<b>Nom / référence du contrat :</b> <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif (réf. interne : R.ODE/UL/LERN 20-09)	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) :</b>	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
MENET-NEDELEC Florence / Florence.Menet@ifremer.fr	ODE/UL/LER/N
MAHEUX Frank	ODE/UL/LER/N
SIMON Benjamin	ODE/UL/LER/N
RIOU Philippe	ODE
<b>Encadrement(s) :</b>	
<b>Destinataire :</b>	
<b>Validé par : M-P HALM-LEMEILLE</b>	

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
1.1	Contexte de l'étude.....	7
1.2	Objectifs de l'étude.....	11
<b>2</b>	<b>Matériel et méthodes .....</b>	<b>13</b>
2.1	Sélection des secteurs pour les lâchers des bouées .....	13
2.2	Bouées dérivantes : validation <i>in-situ</i> de la circulation côtière.....	14
2.2.1	Le matériel et son fonctionnement .....	14
2.2.2	Information et communication.....	15
2.3	Modèle MARS-3D.....	15
2.3.1	Présentation.....	15
2.3.2	Eléments techniques.....	15
2.3.3	Configuration baie de Seine « bdse » .....	16
2.4	Modalités d'exploitation des résultats .....	17
2.4.1	Indicateurs de comparaison des trajectoires réelles et simulées .....	17
2.4.2	Méthode d'étude des temps de renouvellement dans les masses d'eau .....	18
<b>3</b>	<b>Bilan des lâchers de bouées et validation du modèle .....</b>	<b>21</b>
3.1	Lâchers de bouées réalisés .....	21
3.2	Calibration du modèle MARS-3D .....	23
3.2.1	Hauteurs d'eau .....	23
3.2.2	Courants de marée .....	23
3.3	Calibration du modèle MARS-3D .....	24
3.3.1	Trajectoires et paramétrisation .....	24
3.3.2	Résultats de la calibration.....	26
3.3.3	Résumé de la calibration .....	28
<b>4</b>	<b>Comparaison des trajectoires réelles et simulées.....</b>	<b>29</b>
4.1	Présentation des résultats par secteurs .....	29
4.1.1	Secteur : Baie du Mont Saint-Michel .....	29
4.1.2	Secteur : Ouest Cotentin.....	32
4.1.3	Secteur : Nord Cotentin .....	38
4.1.4	Secteur : Barfleur .....	39
4.1.5	Secteur : Baie des Veys (HC10, HT06).....	41
4.1.6	Secteur : Côte du Bessin (HC11) .....	45
4.1.7	Secteur : Côte de Nacre (HC12, HC13).....	48
4.1.8	Secteur : Côte Fleurie (HC15).....	51
4.1.9	Secteur : Estuaire de Seine (HT03, HC16) .....	53
4.1.10	Secteur : Pays de Caux (HC17, HC18).....	57
4.2	Synthèse des indicateurs par masse d'eau .....	60
4.3	Considérations sur la réponse du modèle par rapport aux données <i>in situ</i> .....	62

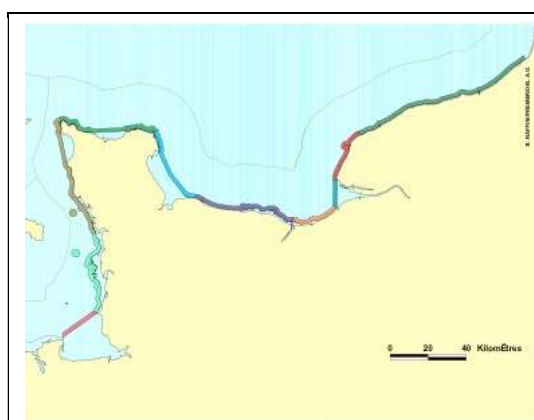
<b>5</b>	<b>Etude des temps de renouvellement dans les masses d'eau</b> .....	<b>63</b>
5.1	Secteur Ouest Cotentin .....	63
5.1.1	Evolution spatiale des temps de renouvellement.....	63
5.1.2	Evolution temporelle des particules dissoutes .....	64
5.2	Secteur Nord et Est Cotentin.....	66
5.2.1	Evolution spatiale des temps de renouvellement.....	66
5.2.2	Evolution temporelle des particules dissoutes .....	67
5.3	Secteur baie de Seine orientale.....	70
5.3.1	Evolution spatiale des temps de renouvellement.....	70
5.3.2	Evolution temporelle des particules dissoutes .....	71
5.4	Secteur Pays de Caux.....	75
5.4.1	Evolution spatiale des temps de renouvellement.....	75
5.4.2	Evolution temporelle des particules dissoutes .....	76
<b>6</b>	<b>Discussion sur la représentativité des points de surveillance</b> .....	<b>77</b>
6.1	Secteur Ouest Cotentin .....	79
6.2	Secteur Nord Cotentin.....	80
6.3	Secteur Est Cotentin .....	81
6.4	Secteur Calvados .....	82
6.5	Secteur Estuaire de Seine .....	83
6.6	Secteur Pays de Caux.....	84
<b>7</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>Références</b> .....	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Annexe</b> .....	<b>87</b>

# 1 Introduction

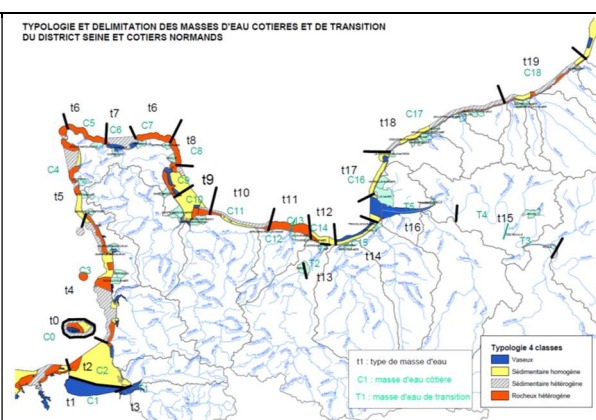
## 1.1 Contexte de l'étude

La Directive Cadre sur l'Eau (**DCE**, 2000/60/CE) a été adoptée par les Etats membres en octobre 2000 afin d'établir un cadre pour la protection des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines. Les Etats membres doivent ainsi veiller à ce que soient établis des programmes de surveillance de l'état des eaux afin de dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux au sein de chaque district hydrographique. Dans chacun de ces districts hydrographiques, les Etats membres doivent déterminer l'emplacement et les limites des masses d'eau de surface (dont les eaux littorales), effectuer une caractérisation de toutes ces masses d'eau en les catégorisant (par exemple, eaux de transition ou eaux côtières), et en les répartissant en types. L'identification des masses d'eau a été un processus itératif qui a été finalisé en mars 2005. Celle-ci peut en outre être vérifiée et affinée avant la publication des plans de gestion des bassins versants (SDAGE<sup>1</sup>), et revue en décembre 2013 puis tous les six ans.

L'Ifremer avait été chargé en 2002 par l'Etat de proposer pour l'ensemble du littoral français une typologie des masses d'eau côtière et de transition, dans le cadre du Groupe de Travail DCE « Eaux littorales » dont les Agences de l'Eau sont membres. La difficulté de la tâche consistait à définir des critères de zonage basés sur l'environnement physique alors que ces zones seraient examinées par la suite en fonction de critères biologiques pour lesquels une relative homogénéité serait recherchée. L'échelle retenue devait permettre la mise en place de stations, représentatives de la masse d'eau considérée pour le contrôle de surveillance. De plus, l'emprise spatiale de chaque masse d'eau devait être compatible avec une échelle de gestion opérationnelle à l'intérieur de chaque district hydrographique. Le système B proposé par la DCE a été privilégié, permettant de définir des zones en fonction de deux critères dont l'importance sur la biologie (benthique et pélagique) est démontrée : la capacité de renouvellement des eaux et les caractéristiques géomorphologiques. Dans cette étude préalable, l'échelle spatiale d'un secteur a été considérée arbitrairement de l'ordre de 20 à 50 km, et la caractérisation a été basée sur les variables : marnage, salinité, paramètre de stratification, courants résiduels, profondeur moyenne, turbulence, et faciès sédimentaires (ici au nombre de cinq). Cette méthode a permis de faire apparaître 10 secteurs pour 9 types de masses d'eau, dont la limite est située à 1 mille à partir du zéro hydrographique du SHOM au 1 : 50 000, ou des arcs de la ligne de base, ou des bancs et objets isolés (**Figure 1**).



**Figure 1 :** Découpage du littoral normand en 10 secteurs en novembre 2002.



**Figure 2 :** Découpage du littoral normand en 18 masses d'eau côtières et 5 masses d'eau de transition en décembre 2002.

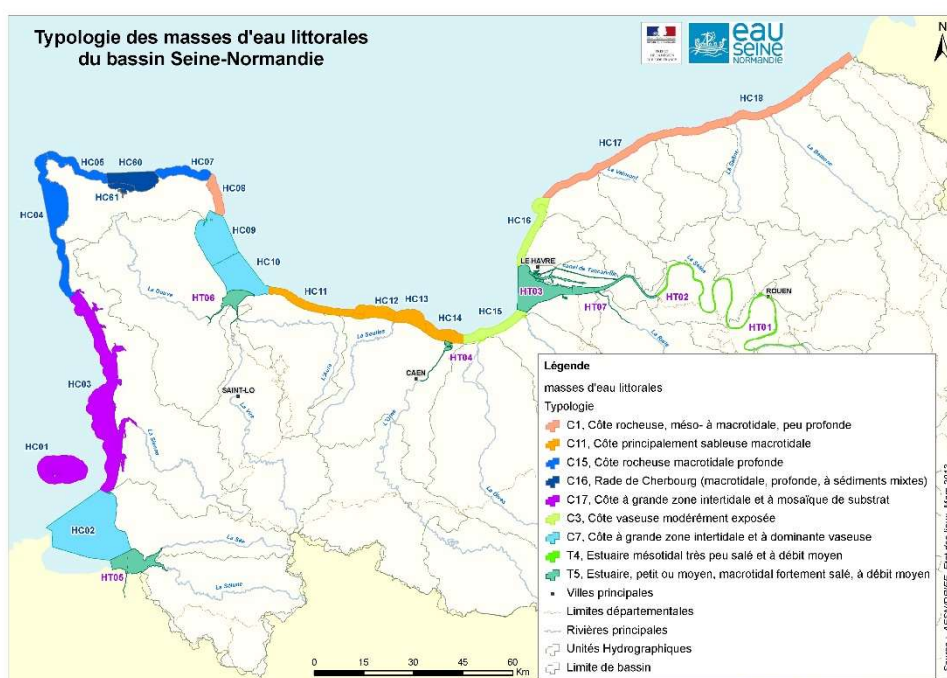
<sup>1</sup> Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

Le Groupe de Travail DCE « Eaux Littorales » dans le bassin Seine-Normandie a finalisé la typologie pour la délimitation des masses d'eau en décembre 2002, à partir des 10 secteurs préalablement définis, en basant la réflexion sur les faciès sédimentaires et en y intégrant les critères de pressions : urbaine, industrielle, agricole, et directes sur le milieu marin (activités conchylicoles et maritimes (ports)). La réflexion a abouti à la création de 18 masses d'eau côtières et 5 masses d'eau de transition (*Figure 2*).

Pour l'Atlantique, la Manche, et la Mer du Nord, cette deuxième phase à l'échelle des bassins a conduit à l'identification d'un nombre très important de types (une cinquantaine) sans que cela ne corresponde à une réalité en termes de diversité écologique. Un travail de regroupement de types a donc été effectué après, toutefois, avoir pris en compte de nouveaux facteurs jugés pertinents, comme la surface du bassin versant pour les eaux de transition, et une deuxième nature de substrat pour les eaux côtières. Finalement, les facteurs utilisés ont été :

- **Pour les eaux de transition** : salinité, marnage, mélange, pourcentage de la masse d'eau couvert par la zone intertidale, débit, surface du bassin versant, surface de l'estuaire et turbidité ;
- **Pour les eaux côtières** : marnage, profondeur, vitesse du courant, exposition aux vagues, temps de résidence, mélange, deux principaux substrats, et pourcentage de la masse d'eau couvert par la zone intertidale.

Ce travail a conduit à identifier 9 types d'eaux de transition et 17 types d'eaux côtières qui ont été entérinés dans la Circulaire 2005-11 d'avril 2005. Dans le bassin Seine-Normandie, un total de 19 masses d'eau côtières et 7 masses d'eau de transition ont ainsi été définies, à partir de respectivement 7 et 2 typologies (*Figure 3*).

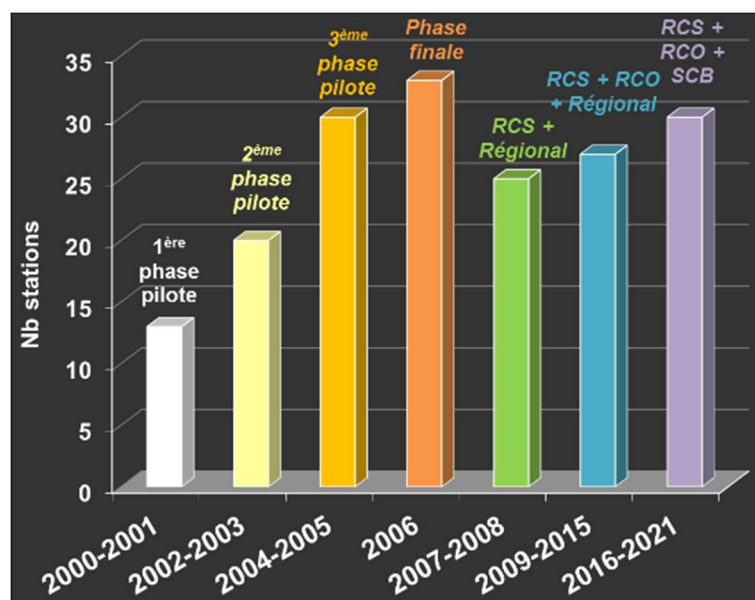


*Figure 3 : Carte de délimitation des masses d'eau DCE depuis 2004.*

La DCE stipule qu'un site de contrôle de surveillance correspond à l'ensemble des stations qui permettent de qualifier l'état d'une masse d'eau, les stations de mesure d'un même site étant positionnées en des points homogènes du point de vue des pressions, et hors de l'influence directe des rejets, afin d'intégrer les pressions s'exerçant sur l'ensemble de la masse d'eau.



Le Réseau Hydrologique Littoral Normand (**RHLN**) a débuté à l'automne 2000 par une première phase pilote (2000-2001) ayant pour objectif d'identifier les zones les plus vulnérables ou les plus sensibles vis-à-vis du phénomène d'eutrophisation et de tester la faisabilité d'un réseau en 11 points préexistants : 8 points du réseau REPHY-Environnement<sup>2</sup>, 1 point du réseau IGA<sup>3</sup>, et 1 station MAREL<sup>4</sup>. Entre 2002 et 2006, le Groupe de Travail DCE « Eaux littorales » Seine-Normandie s'est réuni à de multiples reprises afin de faire évoluer le nombre de points du réseau (entre 10 et 30) afin de définir un réseau dont la stratégie permet d'évaluer la qualité des masses d'eau littorales à partir de 2007 (**Figure 4**). Le positionnement des points de suivi de chacune des masses d'eau a été réalisé au départ à dire d'experts, en se basant sur les réseaux existants (REPHY, RNO<sup>5</sup>, IGA, MAREL), et pour les nouveaux points en se basant sur les enjeux, les pressions et/ou dystrophies déjà constatées. Cependant, les points de réseaux existants (ou « historiques ») avaient été positionnés afin de répondre au mieux aux objectifs propres du réseau auquel il appartenait. Ainsi, par exemple, la plupart des points du REPHY étaient positionnés au plus près des zones de production conchylicole afin de bien suivre l'évolution des peuplements phytoplanctoniques, et en particulier celle des espèces toxiques pouvant être filtrées par les coquillages et les rendre impropre à la consommation. La définition d'un RHLN dont la stratégie doit permettre de répondre à la DCE, nécessite donc d'évaluer la pertinence de la localisation des points d'échantillonnage, c'est à dire la représentativité spatiale de l'échantillon prélevé par rapport à la qualité de l'ensemble de la masse d'eau. Les outils disponibles à cette fin jusqu'alors étaient les images satellites de la production chlorophyllienne et la modélisation hydrodynamique permettant de retranscrire les courants de marée et leurs effets sur les masses d'eau en Manche. En effet, la modélisation permet d'évaluer l'homogénéité des masses d'eau par la simulation des panaches de « rejets », et d'étudier la représentativité d'un point en lâchant un traceur conservatif afin d'observer son devenir dans sa propre masse d'eau, et éventuellement les masses d'eau adjacentes.



**Figure 4** : Evolution du nombre de points du RHLN depuis la première phase pilote en 2000-2001.

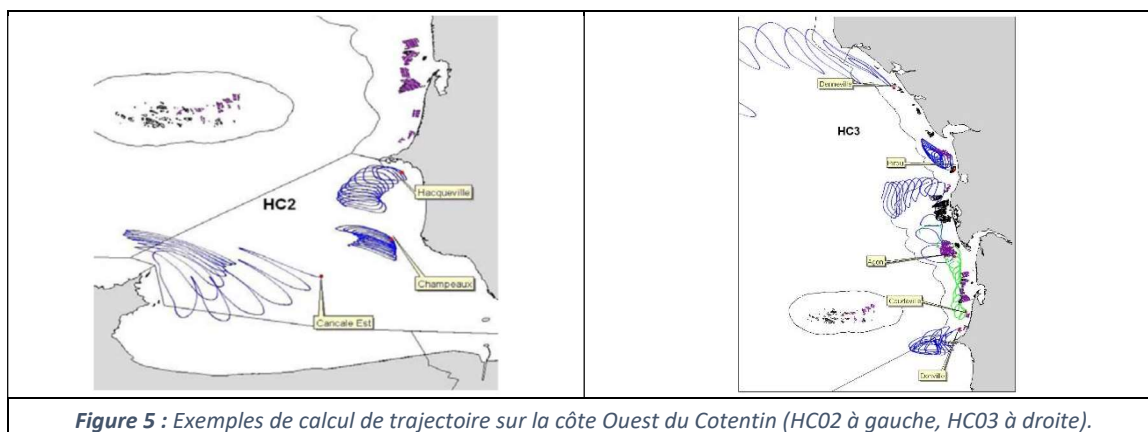
<sup>2</sup> REPHY : Réseau de surveillance du phytoplancton.

<sup>3</sup> IGA : Impact des Grands Aménagements : Surveillance écologique des centrales nucléaires de production d'électricité de bord de mer.

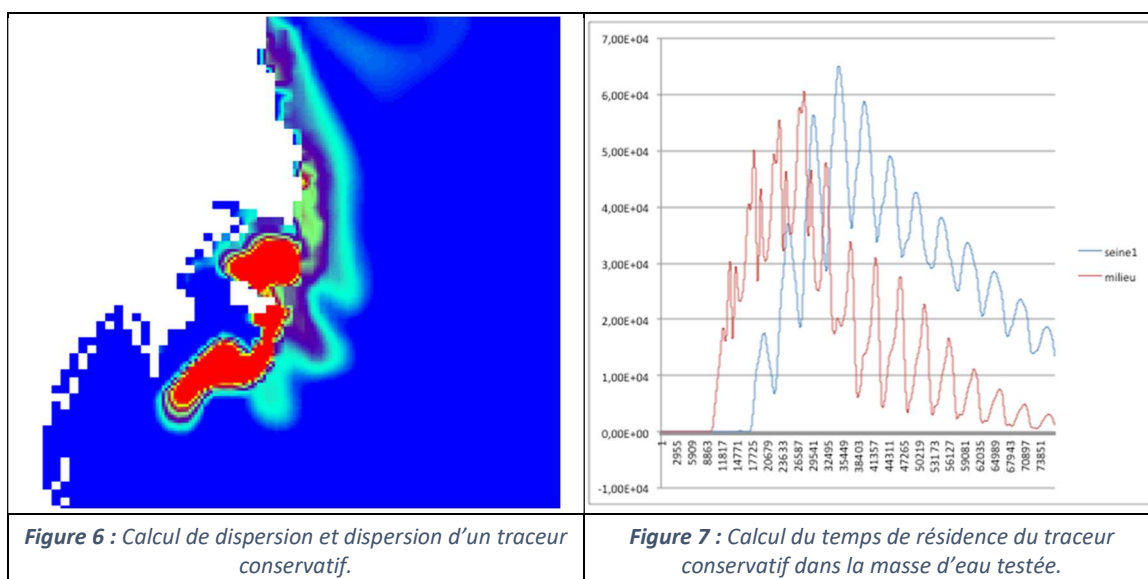
<sup>4</sup> MAREL :

<sup>5</sup> RNO : Réseau National d'Observation du milieu marin.

Ainsi, la représentativité des points historiques et nouveaux points créés pour le besoin initial de la DCE a fait l'objet d'une première étude complémentaire approfondie en 2005, basée sur ces outils. Un lâcher d'un traceur conservatif a été réalisé sur chacun des points d'échantillonnage du réseau tel qu'il existait en 2005, et sa trajectoire observée avec des conditions marégraphiques précises (un cycle morte-eau / vive-eau). Un exemple de ce travail sur les masses d'eau de la côte Ouest Cotentin est présenté sur la **Figure 5**. Ce premier travail avec les outils alors disponibles, a permis de définir une nouvelle stratégie pour le RHLN 2006, avec la confirmation du positionnement de certains points, le besoin d'en créer de nouveaux, d'en supprimer ou d'en déplacer (Le Goff *et al.*, 2005).



Dans le cadre de la révision du programme de surveillance DCE pour le SDAGE 2016-2021, une deuxième étude a été menée en 2015 (Menet-Nédélec *et al.*, 2018) avec les mêmes objectifs de vérifier la pertinence du positionnement des points d'échantillonnage (i) en utilisant un nouvel outil de modélisation hydrodynamique 3D, (ii) en couplant une analyse de l'advection et de la dispersion (**Figure 6**) d'un traceur conservatif, et (iii) en utilisant la modélisation des panaches des fleuves principaux réalisée dans d'autres projets. De plus, des calculs de temps de résidence (**Figure 7**) ont été réalisés afin de compléter le panel de résultats sur le caractère « représentatif » du point. Ce travail a permis de confirmer/nuancer les résultats acquis lors de la première étude effectuée en 2005, et d'établir une nouvelle stratégie pour le RHLN en 2016 (**Figure 8**). Les résultats ont cependant mené à des questionnements sur la délimitation de certaines masses d'eau DCE et donc de la représentativité de certains points.



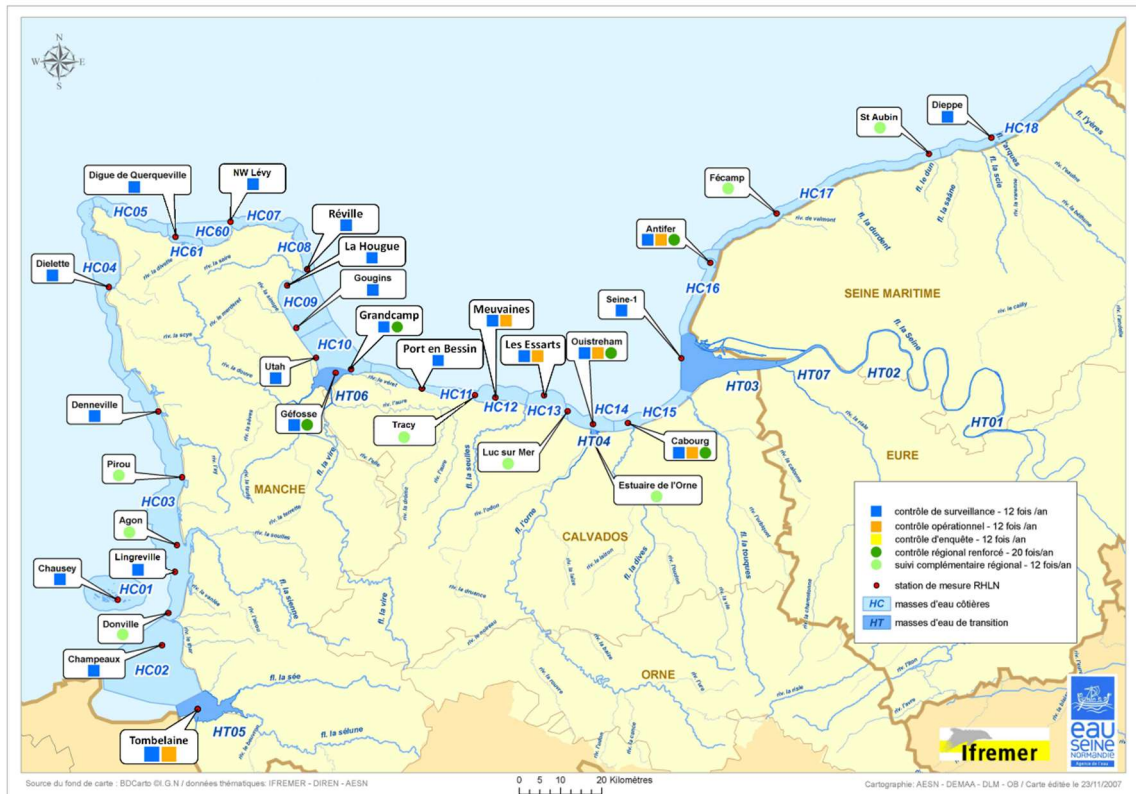


Figure 8 : Stratégie d'échantillonnage du RHLN en 2016.

## 1.2 Objectifs de l'étude

Les objectifs de cette étude sont de fournir de nouveaux éléments de réflexion afin de discuter de i) la délimitation des masses d'eau, et ii) la pertinence du positionnement géographique des points d'échantillonnage au sein de chaque masse d'eau *via* l'étude de leur représentativité ainsi que les pressions environnementales (exutoires, embouchure de cours d'eau) qui peuvent s'exercer.

En effet, la présente étude présente une approche *in situ* afin de confirmer l'ensemble des travaux réalisés par modélisation hydrodynamique. Cette nouvelle approche n'avait pas pu être initiée jusqu'à ce jour faute de matériel *ad hoc*. Des bouées dérivantes équipées d'une ancre flottante et d'un système de positionnement intégré (localisation géographique en temps réel) ont été acquises ces dernières années au LER/N.

Par ailleurs, ce travail permet d'affiner les connaissances de l'hydrodynamique des masses d'eau côtière et de la circulation générale résiduelle. En effet, de nombreux travaux récents menés par le LER/N ont déjà mis en lumière des zones dont la courantologie est délicate à retranscrire par modélisation numérique. Cette étude est donc l'opportunité sur ces zones complexes de confronter les mesures *in situ* acquises avec les résultats issus des simulations des derniers outils de modélisation de la physique côtière dans l'objectif de réduire les incertitudes du modèle.

Ainsi, cette étude a été réalisée dans plusieurs secteurs géographiques sur deux ans et selon différentes configurations de conditions de vent (secteur du Sud au Nord-Ouest et secteur du Nord au Sud-Est).



## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Sélection des secteurs pour les lâchers des bouées

Les secteurs sélectionnés pour les lâchers des bouées sont les suivants (Figure 9) :

- 1) **La côte Sud de l'Ouest Cotentin entre les masses d'eau HC02 et HC03** : sur ce secteur de nombreuses problématiques sont en jeu (i) affiner notre connaissance de l'hydrodynamique entre la baie du Mont St-Michel jusqu'à Barneville-Carteret, (ii) vérifier la pertinence de certaines stations d'échantillonnage comme Donville, et enfin (iii) évaluer les impacts respectifs des pressions exercés par les havres (Vanlée, Regnéville, et St Germain) sur les points de mesures de la masse d'eau HC03.
- 2) **Le Nord Cotentin et plus particulièrement les limites des masses d'eau HC60, HC07 et HC08** avec des focus sur les stations Réville 1 mille et Nord-Ouest Lévi.
- 3) **La baie des Veys et la masse d'eau HC10** afin de vérifier les pressions exercées par les exutoires des bassins versants de la Douve - Taute d'un côté et de Vire - Aure de l'autre.
- 4) **Le plateau du Calvados et la limite géographique entre les masses d'eau HC11 et HC12.**
- 5) **L'estuaire de la Seine et le littoral de Seine - Maritime**, c'est à dire entre les masses d'eau HT03, HC16, HC17 et HC18, où l'hydrodynamique est mal connue et méritait d'être approfondie dans le cadre de cette étude.

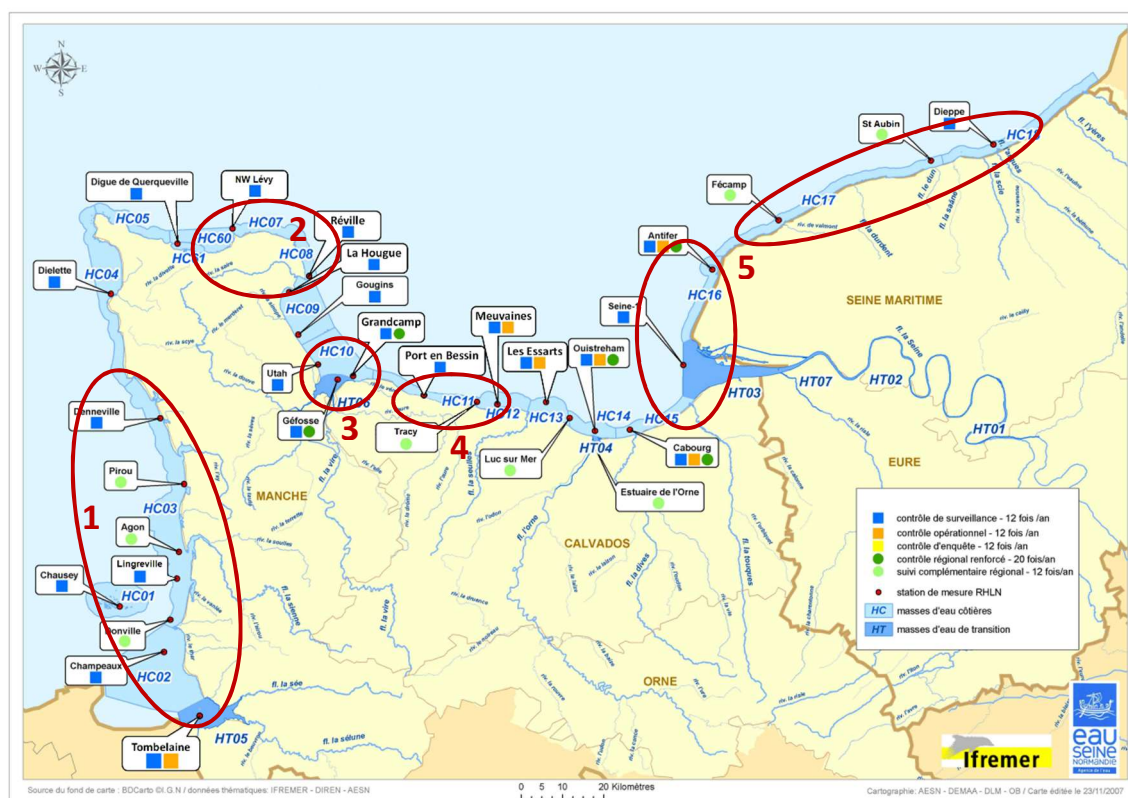


Figure 9 : Secteurs sélectionnés pour les lâchers de bouées du projet RESUME.

## 2.2 Bouées dérivantes : validation *in-situ* de la circulation côtière

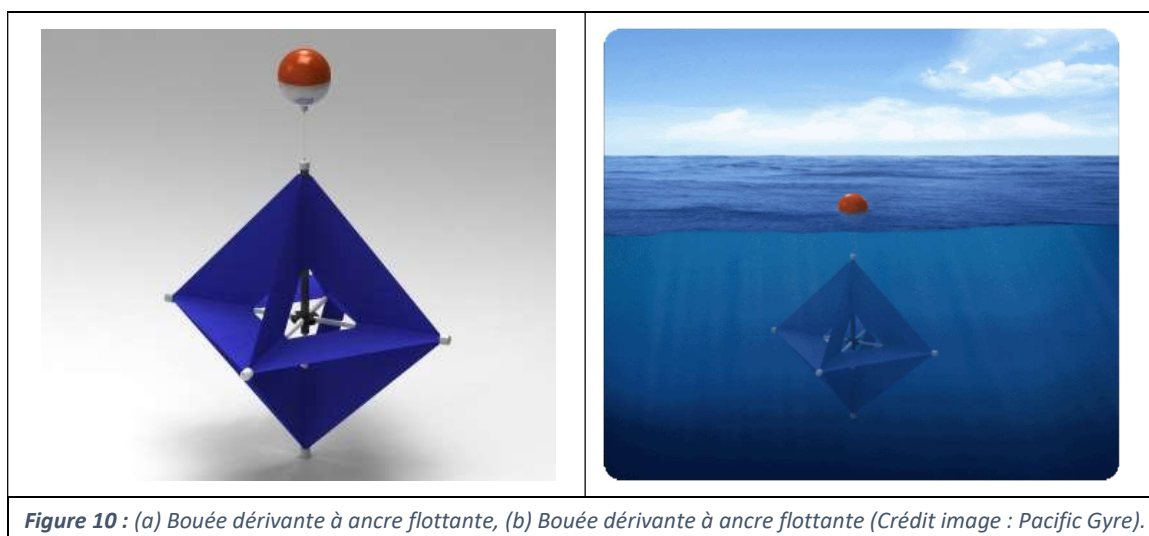
Les modèles numériques prennent en compte les phénomènes d'advection-dispersion liés aux courants tidaux et aux courants générés par le vent. Cela permet d'effectuer des simulations de transport de substances dissoutes ou particulaires en prenant en compte les forçages de la marée et du vent. Pour s'assurer de la pertinence des informations simulées, une étape indispensable est la calibration-validation du modèle ; les instruments adaptés pour une validation de ce type étant, entre autres, des flotteurs à ancre flottantes. Ces flotteurs envoient leur position GPS à une fréquence donnée (toutes les 10 minutes par exemple) en utilisant le mode de communication iridium par satellite. Les positions des bouées en temps réel sont ensuite accessibles, via un serveur internet.

### 2.2.1 Le matériel et son fonctionnement

Le matériel utilisé est composé de :

- ✓ 6 bouées équipées de drogues (ou ancres flottantes) ;
- ✓ 1 station iridium embarquée permettant d'obtenir les positions des bouées en quasi temps réel via des communications satellites.

Les bouées sphériques, de diamètre 21 cm, ont une flottabilité calculée pour que seule la demi-sphère supérieure de couleur vive soit émergée, réduisant ainsi sa sensibilité au vent et à l'énergie des vagues à la surface de l'eau (**Figure 10**). Chacune d'elles est reliée par un câble textile (30 cm) à une ancre flottante qui la maintient dans la veine de courant, l'ensemble ayant un tirant d'eau de 1,75 m. Ce matériel a été conçu pour suivre les courants à 1 m de la surface.



Chaque bouée est équipée d'une carte électronique gérant un récepteur GPS et l'envoi de la trame GPS par satellite, d'une batterie assurant une autonomie d'environ un mois et d'un capteur de température de l'eau. Ce matériel a été acquis auprès de la société « Pacific Gyre » spécialisée dans ce type d'instruments.

Les communications Iridium sont facturées par la société Pacific Gyre au nombre de transmissions de positions réalisées. Le suivi en temps réel, le contrôle et les réglages de ces bouées s'effectuent via un site internet permettant :

- ✓ de gérer l'activation/désactivation de l'émission des bouées et de la station de base ;
- ✓ de configurer les bouées, en particulier la fréquence de l'émission des coordonnées géographiques (10 mn pour cette étude),

- ✓ de visualiser en temps réel la position géographique, et son « âge » (dans l'espace-temps de 10 mn), l'état de la batterie, la température de l'eau (°C) et le trajet ;
- ✓ d'exporter les trajets obtenus sous différents formats, en particulier au format KML ;
- ✓ de suivre en temps réel, via une connexion internet, la progression des bouées et de programmer leur récupération.

## 2.2.2 Information et communication

La réussite des lâchers de bouées repose logiquement sur une absence d'intervention, délibérée ou non (relevage, abordage, ...), pendant la durée de la dérive. Il a donc été décidé de communiquer très largement auprès des différents usagers de la mer de la présence de ces bouées (Comité Régional des Pêches Maritimes et des élevages marins (CRPM), Syndical Mixte des Espaces Littoraux de la Manche (SyMEL), organismes professionnels Jersiais, etc.). Le CRPM a prévenu ses représentants locaux ainsi que tous les pêcheurs disposant d'une messagerie électronique.

Conformément à la réglementation, une demande spéciale a été faite auprès de la Préfecture Maritime de la Manche et de la mer du Nord (Division « Action de l'Etat en mer ») avec constitution d'un dossier technique et scientifique. Après obtention des autorisations d'immersion (cf. Annexe), chaque opération, en début et fin, a également fait l'objet d'informations particulières (jours, heures, positions géographiques, etc.) auprès du Centre des Opérations Maritimes (Marine Nationale) et du CROSS de Jobourg.

## 2.3 Modèle MARS-3D

### 2.3.1 Présentation

Le code hydrodynamique MARS (Model for Applications at Regional Scales) est un modèle communautaire développé et diffusé par l'équipe DYNECO/DHYSED de l'Ifremer et l'UMR LOPS (<http://www.umr-lops.fr/>). Ce code est dédié à la modélisation océanographique côtière à des échelles régionales et littorales (quelques centaines voire dizaines de mètres), et intègre une forte composante environnementale (sédimentologie et biogéochimie). Les éléments théoriques et la description du formalisme numérique sont présentés dans Lazure et Dumas (2008).

Le modèle MARS est adapté aux applications côtières, gère les bancs découvrants (zone d'estran) et permet, grâce à un schéma semi-implicite, de réaliser des simulations longues (plusieurs années) avec un pas de temps important (10 - 100 s) malgré une résolution spatiale élevée (centaines de mètres et moins).

### 2.3.2 Eléments techniques

Le modèle hydrodynamique MARS est un algorithme de calcul des courants marins, des hauteurs d'eau et des concentrations des substances dissoutes (ou en suspension temporaire) advectées. Le schéma de résolution des équations de Navier-Stokes repose sur la méthode des différences finies sur un maillage régulier, en deux ou trois dimensions, pour une plus grande souplesse d'utilisation et de réduction de temps de calcul. La bathymétrie est prise en compte par un découpage vertical en niveaux sigmas épousant le profil du fond. L'algorithme du code repose sur les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, résolu selon une expression semi-implicite de la surface libre. Dans sa version tridimensionnelle, MARS 3D procure également la distribution du courant sur la verticale, la température de la mer, la salinité, et la hauteur d'eau. Il est possible d'introduire dans le modèle, parmi les variables de forçage, des flux

issus de bassins versants ou de rejets en mer et de simuler le transport et la diffusion de ses substances dissoutes et/ou particulières dans la masse d'eau.

Il permet de modéliser sous forme de calculs instantanés ou de synthèse (valeurs moyennes, maxi, mini...) les grandeurs suivantes :

- ✓ le courant (composantes U et V) et les résiduelles eulériennes ;
- ✓ la hauteur du plan d'eau, les niveaux moyens et les composantes harmoniques de marée ;
- ✓ la salinité, la température ;
- ✓ des constituants provenant de rejets (par exemple les coliformes fécaux) ;
- ✓ le transport sédimentaire et les dépôts.

Le modèle MARS utilise une technique d'emboîtement de modèles sous forme gigogne. Par cette technique un modèle de grande emprise et de basse résolution horizontale (grande maille) contient lui-même un ou plusieurs sous modèles (loupes). Ces derniers reçoivent des modèles qui les précèdent, les conditions aux limites sur leur périmètre. Au plan spatial les modèles intermédiaires possèdent une maille environ 4 fois plus petite que celle du modèle précédent. Le modèle de grande emprise s'étend jusqu'au plateau continental et trouve ses conditions aux limites dans la valeur des ondes générant la marée au large.

### 2.3.3 Configuration baie de Seine « bdse »

Le modèle utilisé est le modèle MARS dans sa version V11.0. Il a été adapté aux besoins de la zone, notamment par une correction bathymétrique plus précise à partir de données existantes (**Figure 11**). En outre, le modèle a la capacité de prendre en compte les bancs-découvrant (estran), phénomène amplifié en manche.

La configuration « bdse » (pour Baie de Seine Etendue) reprend les éléments de la configuration du modèle « norm » à 200 m et étend le domaine de calcul à la pointe de Hourdel. La résolution et les forçages aux limites ouvertes restent identiques : conditions de marée aux limites ouvertes de la grille ; les hauteurs d'eau et courants 2D interpolés sur l'atlas du SHOM CSTFrance ; les conditions météorologiques issues du modèle AROME de Météo-France (données de pression, température, couverture nuageuse, humidité et vent à 10 m à une résolution de 2 km). Ces données sont lues sur l'espace Dataref du calculateur de l'Ifremer.

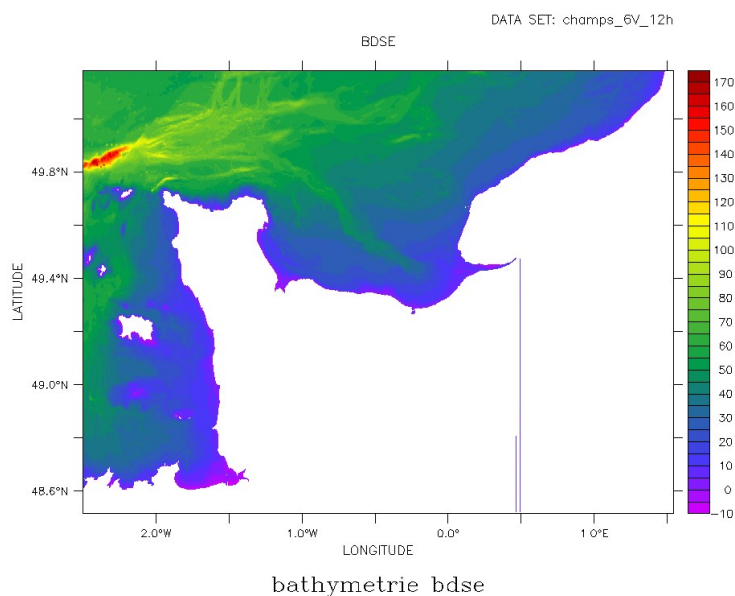


Figure 11 : Bathymétrie du modèle bdse à 200 m.



Des tests préalables sur des cas schématiques ont montré des différences minimales mais réelles, ce qui confirme le bien-fondé de l'utilisation de la version 3D. Il semble donc que le modèle 3D soit le plus précis, notamment pour le cas particulier des masses d'eau estuariennes dont la dynamique est influencée par la structure en densité, non résolue par le modèle 2D.

## 2.4 Modalités d'exploitation des résultats

### 2.4.1 Indicateurs de comparaison des trajectoires réelles et simulées

Les trajectoires des bouées réelles et simulées donnent, outre les tracés des trajectoires, des indicateurs de distances, de direction, et de temps passé dans la masse d'eau initiale. Cette approche lagrangienne ne permet pas de qualifier à proprement parler la représentativité du point de surveillance, mais il est possible d'exprimer, par exemple, le temps de résidence de particules dans la masse d'eau dans le cas d'une trajectoire. En effet, ces simulations sont effectuées en conditions réalistes, et la météo joue un rôle prépondérant sur la dérive des bouées en surface, qui peut être accentuée par rapport au mouvement oscillant de la masse d'eau. La trajectoire globale marquée par l'oscillation de la marée et soumise aux conditions de vent permet de caractériser la circulation dans la masse d'eau, quand le vent n'est pas prédominant. Pour parler de représentativité, il faudrait étudier la trajectoire pour plusieurs situations de vent. Néanmoins, cette première approche donne une base de réflexion, et permet également de qualifier la réponse du modèle en fonction des secteurs.

Pour chaque lâcher, le temps passé par la bouée dans la masse d'eau de départ est donné. Les lâchers de 2016 ont été simulés par une configuration du modèle dont la frontière nord s'étend jusqu'à la baie de Somme. Les forçages météorologiques et les paramètres numériques restent identiques. Cette extension permet de suivre les bouées lâchées plus au nord. Les trajectoires des bouées sont également commentées en regard des données de vent du modèle de Météo-France « AROME », d'une résolution de 2 km à échéance horaire, afin d'expliquer les directions différentes de la dérive naturelle causée par la marée.

Les indicateurs présentés sont les suivants :

- ✓ **Direction moyenne** (°N) ;
- ✓ **Temps passé par la bouée dans la masse d'eau** (comprend les allers-retours) ;
- ✓ **Vitesse moyenne de la bouée** (en nœuds) ;
- ✓ **Distance filtrée de la marée par jour** (en milles nautiques) : distance à vol d'oiseau entre le point de départ et le point d'arrivée par jour ;
- ✓ **Distance au point de mise à l'eau après 48 h de dérive** (en milles nautiques) : distance parcourue par la bouée par rapport à sa position de mise à l'eau après 48 h ;
- ✓ **Etalement du nuage de points.**

**A noter pour l'interprétation :** Plus le trajet effectué pour aller d'un point A à un point B est long, plus le mélange est important. Dans le cas d'une substance dissoute le mélange sera plus important. La dérive résiduelle correspond au décalage entre le point de départ et l'arrivée.

Pour cette évaluation, les trajectoires présentées ci-après sont issues de travaux passés (2013), et des lâchers effectués dans le cadre du projet RESUME (2016, 2017, 2018), pour un total de 26 trajectoires. Celles-ci ont été regroupées par secteurs géographiques pour l'évaluation.

## 2.4.2 Méthode d'étude des temps de renouvellement dans les masses d'eau

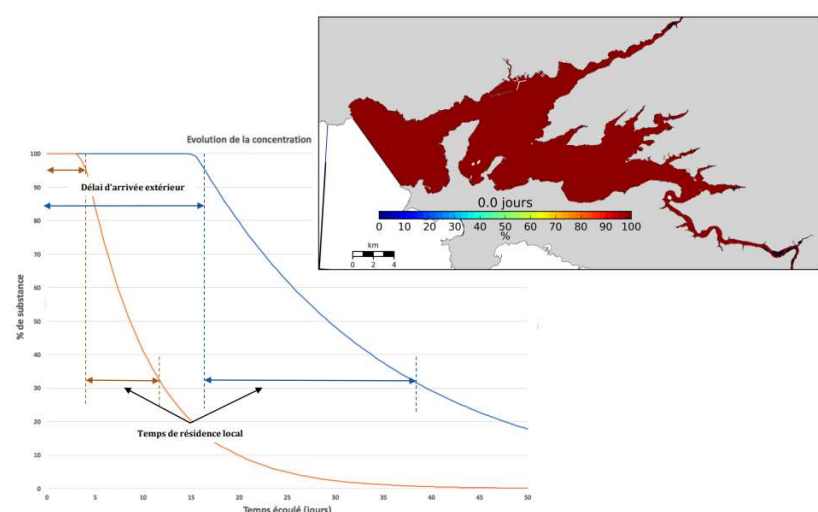
La méthode proposée est de suivre la concentration d'un traceur passif dissous dans chaque masse d'eau. La masse d'eau est initialisée avec un traceur distinctif qui se disperse ici, sous l'effet unique des courants de marée (et de densité en présence de panache d'eau douce). Ce traceur permet de suivre dans le temps la quantité globale de substance dans le périmètre de la masse d'eau et au point de suivi RHLN. Leurs décroissances dans le temps sont ainsi comparées graphiquement.

A partir des concentrations au cours du temps, il est possible d'estimer en chaque point de grille des indicateurs comme le *flushing time*. Les calculs de ces grandeurs sont explicités dans la bibliographie (Jouon *et al.*, 2006) et sont appliqués ici, bien que le milieu soit ouvert (et non semi ouvert, où la notion de temps de renouvellement est plus parlante).

Voici les définitions issues de l'article :

- ✓ *Flushing Time* par masse d'eau : égal au temps pour que la concentration  $C(t) = C_0 \times 1/e$  dans la limite du volume.
- ✓ *Temps de renouvellement* local par maille : temps pour que la concentration passe de  $C_1 = C_0 \times 95\%$  à  $C_0 \times 1/e$ .
- ✓ *Flushing lag* par maille : temps que met la concentration pour descendre à 95% de  $C_0$ .

Pour cette étude, la notion de *temps de renouvellement* a été préférée (*i.e. flushing time*, à ne pas confondre avec le temps de renouvellement local, qui se déclenche à partir d'une décroissance de 5%). La notion de *flushing lag* ne paraît pas utile ici, dans la mesure où les zones délimitées sont très ouvertes et atteignent rapidement le seuil de 95% de la concentration initiale, tel qu'il est décrit dans la publication de référence. Cette approche permet de connaître la décroissance en concentration en chaque maille et d'estimer cet indicateur (**Figure 12**).



**Figure 12** : Représentation des indicateurs temporels (source S. Petton, Ifremer, journées Zabri).

La simulation est lancée sur un mois réel du 20/01/2019 au 20/02/2019, démarrant par un coefficient de vive-eau moyenne (**Figure 13**).



Figure 13 : Coefficients de marée pendant la période des simulations.

En pratique, chaque masse d'eau est initialisée par une concentration de 100 unité/L, à un instant proche de la pleine mer. Les masses d'eau sont ainsi regroupées en 4 groupes initialisés simultanément (Figure 14) : l'ouest Cotentin, de Cherbourg à Port-En-Bessin, de Tracy-Sur-Mer à Antifer, et enfin le Pays de Caux.

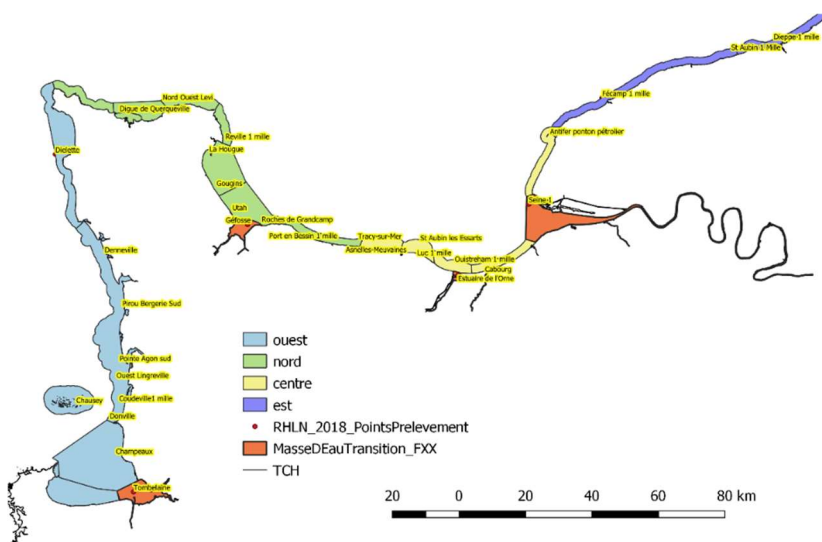


Figure 14 : Regroupement des zones lors de l'initialisation des simulations, et localisation des points RHLN en 2018.

Le léger décalage de la marée pouvant exister entre l'Est et l'Ouest d'un ensemble de masses d'eau n'est pas contraignant dans la mesure où les cartes de concentrations sont tracées à la même « heure-marée » (i.e. à une période de 12h24mn, période de la marée-semi diurne), ou que la donnée horaire est filtrée (e.g. moyenne glissante sur 24h utilisée pour le calcul en 1 point).

Les résultats de ces calculs sont présentés sous deux formes :

**1) Cartes de « temps de renouvellement ».**

Ces cartes sont évaluées à partir du calcul pour chaque maille de la zone représentant la masse d'eau, du temps nécessaire pour que la concentration, évaluée à heure fixe (autour de la pleine mer) passe sous le seuil des 37% depuis le début de la simulation. Cette valeur correspond à la valeur référence de 1/e, utilisée pour le calcul du « temps de renouvellement global ». Il est surtout utilisé pour connaître les zones les moins dispersées dans une même masse d'eau, mais aussi pour comparer les masses d'eau entre elles.

*Remarques :* Les temps de résidence ne sont tracés que dans la zone initiale du lâcher de la substance, ce qui explique les sauts de couleurs sur les frontières. Il n'y a aucune continuité à attendre, en raison de la représentation zone par zone que l'on fait figurer sur une même carte.

**2) Séries temporelles** - Ces courbes présentent sur un même graphe :

- ✓ La concentration totale sur la zone au pas de temps horaire ;
- ✓ La concentration totale filtrée sur 24 h sur la zone ;
- ✓ La concentration filtrée au(x) point(s) de suivi de la masse d'eau.



### 3 Bilan des lâchers de bouées et validation du modèle

#### 3.1 Lâchers de bouées réalisés

Pour les opérations à la mer (largage, récupération des drifters), les moyens nautiques du LER/N ont été mobilisés. Les bouées ont été suivies en temps réel au laboratoire, et des simulations prévisionnelles de dérives ont été effectuées. Le bilan des lâchers effectués est présenté dans le **Tableau 1**, et les positionnements initiaux et finaux des bouées sont indiqués dans les **Figure 15** et **Figure 16**. Au total, les 27 lâchers effectués dans 13 masses d'eau ont dérivé pendant 156 jours et parcouru près de 7000 km (environ 3700 milles nautiques).

**Tableau 1 : Synthèse des lâchers de bouées ayant fait l'objet d'un traitement dans ce rapport.**

Masse d'eau	Identifiant bouée	Lieux		Mise à l'eau		Coordonnées (WGS84)		Dates	Récupération		Durée de dérive (j/h/m)	Distance parcourue (nm)	Distance filtrée de la marée (mm)	Direction moyenne (°N)
				Dates	Coefficients				Coordonnées (WGS84)	Dates				
HC02	LERH-0006	Champaux		26/09/13	47	48° 44.501'N / 1° 35.617'W		02/10/13	48° 50.272'N / 1° 37.745'W	5:18:40	56	5,24	S	
	LERH-0001	Champaux		16/08/17	54	48° 44.788'N / 1° 35.478'W		18/08/17	48° 48.427'N / 1° 34.357'W	2:3:04	16	3,73	N/NO	
	LERH-0003	Lingreville		16/08/17	54	48° 56.302'N / 1° 35.685'W		18/08/17	48° 54.308'N / 1° 34.095'W	2:6:52	25	2,38	N/NO	
	LERH-MS-0009	Lingreville		29/08/17	49	48° 56.593'N / 1° 35.657'W		31/08/17	48° 53.749'N / 1° 34.261'W	1:14:50	12	3,08	S	
	LERH-0005	Donville		16/08/17	54	48° 50.605'N / 1° 37.421'W		20/08/17	48° 43.874'N / 1° 31.994'W	3:18:20	36	7,67	N/NO	
HC03	LERH-MS-0008	Agon Coutainville		29/08/17	49	48° 59.203'N / 1° 36.268'W		31/08/17	48° 54.251'N / 1° 34.145'W	2:3:30	18	5,29	S	
	LERH-0001	Saint Germain		29/08/17	49	49° 12.481'N / 1° 39.439'W		02/09/17	49° 11.779'N / 1° 36.699'W	3:18:20	34	2,05	NO	
	LERH-0006	Donville		02/10/13	69	48° 50.463'N / 1° 37.746'W		06/10/13	48° 56.915'N / 1° 36.497'W	3:15:00	72	5,94	N	
	LERH-0006	Lingreville		06/10/13	98	48° 57.074'N / 1° 36.578'W		07/10/13	49° 01.393'N / 1° 41.224'W	1:3:30	29	4,86	N	
	LERH-0003	Blainville sur Mer		29/08/17	85	49° 04.263'N / 1° 38.541'W		01/09/17	49° 04.880'N / 1° 36.680'W	2:19:00	23	1,30	O	
HC07	LERH-0001	Levi		20/04/17	34	49° 42.784'N / 1° 28.310'W		24/04/17	49° 43.926'N / 1° 38.862'W	3:23:30	146	6,97	O	
HC08	LERH-0002	Réville II		20/04/17	34	49° 41.030'N / 1° 14.659'W		24/04/17	49° 55.604'N / 1° 21.065'W	3:21:40	164	15,23	N	
	LERH-0006	Réville		20/04/17	34	49° 36.506'N / 1° 12.937'W		27/04/17	49° 36.643'N / 0° 54.341'W	6:20:20	336	12,10	E	
HC10	LERH-MS-0009	Grandcamp		11/06/18	76	49° 24.265'N / 1° 04.010'W		25/06/18	49° 32.647'N / 1° 01.015'W	13:19:20	467	8,64	N	
HT06	LERH-MS-0008	Baie des Veuys		23/05/18	56	49° 23.634'N / 1° 08.248'W		29/05/18	49° 37.275'N / 1° 01.825'W	5:18:10	143	14,42	N/NE	
	LERH-MS-0009	Baie des Veuys		23/05/18	56	49° 23.312'N / 1° 06.469'W		29/05/18	49° 32.054'N / 1° 05.844'W	5:17:50	111	8,91	N	
	LERH-MS-0009	Port-en-Bassin		06/06/18	45	49° 21.666'N / 0° 46.159'W		11/06/18	49° 24.252'N / 1° 04.014'W	4:22:50	90	11,88	O	
HC11	LERH-0001	Tracy		01/02/17	90	49° 21.719'N / 0° 38.300'W		06/02/17	49° 31.961'N / 0° 53.038'W	5:4:00	119	10,80	N/NO	
	LERH-0006	Port-en-Bassin		01/02/17	90	49° 21.491'N / 0° 45.453'W		06/02/17	49° 31.448'N / 0° 46.488'W	5:4:10	120	13,28	N/NO	
HC12	LERH-0002	Asnelles		01/02/17	90	49° 21.244'N / 0° 33.833'W		06/02/17	49° 29.667'N / 0° 42.826'W	5:4:40	119	10,37	N/NO	
HC13	LERH-MS-0009	Saint Aubin les Essarts		04/06/18	56	49° 22.034'N / 0° 22.548'W		06/06/18	49° 21.623'N / 0° 46.029'W	2:8:30	42	15,66	O	
	LERH-0003	Villers sur Mer		31/05/18	81	49° 20.866'N / 0° 00.374'W		06/06/18	49° 20.937'N / 0° 33.359'W	5:17:30	77	21,33	O	
HC15	LERH-MS-0009	Cabourg		31/05/18	81	49° 18.576'N / 0° 06.486'W		04/06/18	49° 22.079'N / 0° 22.765'W	4:1:40	66	11,56	O	
HC16	LERH-0001	Antifer		30/01/18	93	49° 36.166'N / 0° 06.110'E		28/02/18	49° 51.561'N / 0° 03.227'E	28:10:20	818	11,61	N	
HT03	LERH-0001	Baie de Seine		28/06/17	56	49° 23.524'N / 0° 03.750'E		04/07/17	49° 42.829'N / 0° 06.231'E	5:22:40	114	19,17	N	
	LERH-0006	Baie de Seine		28/06/17	56	49° 26.153'N / 0° 03.733'E		29/06/17	49° 27.383'N / 0° 07.665'E	0:14:40	8	2,70	O/SO	
HC17	LERH-0006	St Aubin		27/09/16	65	49° 54.521'N / 0° 52.137'E		07/10/16	49° 55.843'N / 0° 46.380'E	10:3:10	289	3,78	O/NO	
HC18	LERH-0001	Dieppe		27/09/16	65	49° 56.426'N / 1° 02.826'E		07/10/16	50° 01.228'N / 1° 05.881'E	10:1:52	216	5,18	N/NE	
13	28									156,67	3766	8,75		



Figure 15 : Carte des positions initiales des lâchers de bouées.



Figure 16 : Carte des positions finales des lâchers de bouées.

La récupération des bouées a majoritairement été effectuée en mer, en surveillant régulièrement leur positionnement afin de permettre leur récupération à l'aide des moyens nautiques du LER/N. Cependant, certaines bouées se sont échouées, sur l'estran (**Figure 17**) ou sur des digues (**Figure 18**).



## 3.2 Calibration du modèle MARS-3D

### 3.2.1 Hauteurs d'eau

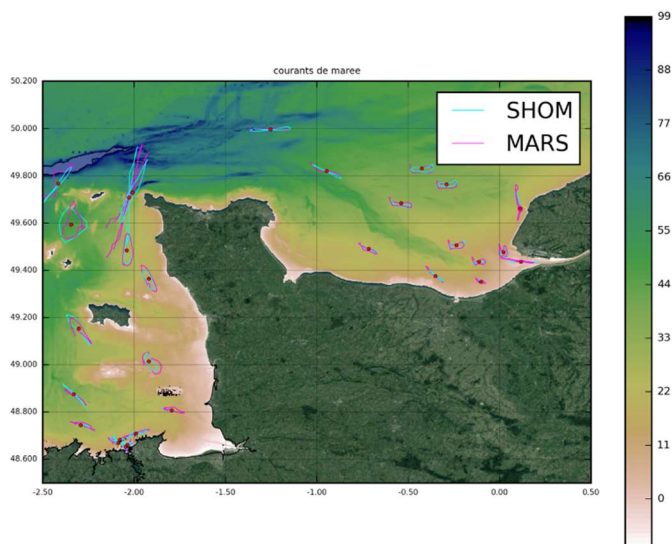
Les variations de hauteurs d'eau sont générées par le phénomène de marée, auquel peut venir s'ajouter le phénomène de surcote / décote, d'origine météorologique. Les hauteurs d'eau calculées dans le modèle ont été comparées aux enregistrements des marégraphes des principaux ports munis d'un enregistreur (Saint-Malo, Dielette, Cherbourg, Ouistreham, Le Havre). Cette validation a été effectuée en condition réalistes, et le modèle a été forcé par les conditions météorologiques du modèle de Météo-France ARPEGE dont la résolution est de 2 km. Les hauteurs ont été comparées en retranchant aux hauteurs du modèle les niveaux moyens de référence du guide 2016 du SHOM.

Les résultats ont montré que le modèle semble être très proche des mesures, et la marée n'accuse pas de retard de phase visible, ce qui est essentiel pour le suivi de flotteurs. Il est cependant à noter que le modèle Norm, n'est en l'état pas connecté à un modèle de la façade atlantique capable d'apporter des informations en provenance du large (par exemple des surcotes). Pour le calcul des courants, le modèle fonctionnant dans cette configuration est suffisant, et permet même d'avoir une marée plus réaliste.

### 3.2.2 Courants de marée

Le modèle simule les courants de marée pour la période de vive eau. Ceux-ci sont comparés aux courants indiqués par le SHOM pour un nombre de points fixes. Ces données sont issues de la mesure. La représentation sous forme de rose permet de valider visuellement la direction et l'intensité des deux courants.

Globalement, les courants simulés sont accord avec ceux du SHOM (*Figure 19*). Les directions des courants de marée sont cohérentes ainsi que les intensités (étirement de l'ellipse). La zone du Raz Blanchard, particulièrement délicate reproduit les bons ordres de grandeurs du courant maximal, et le basculement quasi instantané des courants de marée. Dans l'estuaire de la Seine, la direction du courant est également unique. Plus au large en baie de Seine, les ellipses sont moins écrasées traduisant des renverses moins brutales.

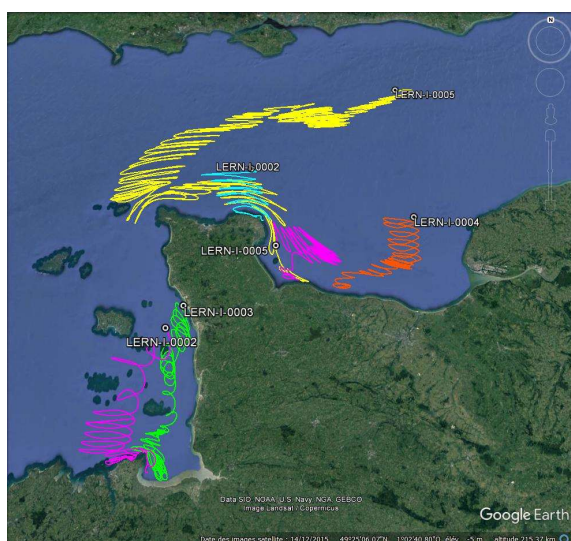


*Figure 19 : Comparaison des courants de marée (2D) du modèle et des cartes SHOM.*

### 3.3 Calibration du modèle MARS-3D

#### 3.3.1 Trajectoires et paramétrisation

L'étape de calibration prévoyait de simuler deux trajectoires de bouées pour chacune des trois secteurs du modèle : ouest Cotentin, nord Cotentin, et est Cotentin. Ces trajectoires ont été choisies en fonction de leur durée et de leur localisation, deux par secteurs, et sur les durées les plus longues disponibles (*Figure 20*). Elles ont également été choisies en fonction de l'excursion des bouées de manière à parcourir la quasi-totalité du modèle. Ces bouées sont suivies sur des périodes allant de 4 jours pour la plus courte à + 40 jours pour la plus longue.



Secteur	Bouée	Date début	Date fin
Est Cotentin	LERN-I-0004	2012/10/09	2012/10/19
	LERN-I-0005	2012/10/09	2012/10/21
Nord Cotentin	LERN-I-0005	2013/03/28	2013/05/09
	LERN-I-0002	2017/04/20	2017/04/24
Ouest Cotentin	LERN-I-0002	2015/07/30	2015/08/06
	LERN-I-0003	2015/08/17	2015/09/01

*Figure 20 : Trajectoires de bouées utilisées pour calibrer le modèle.*

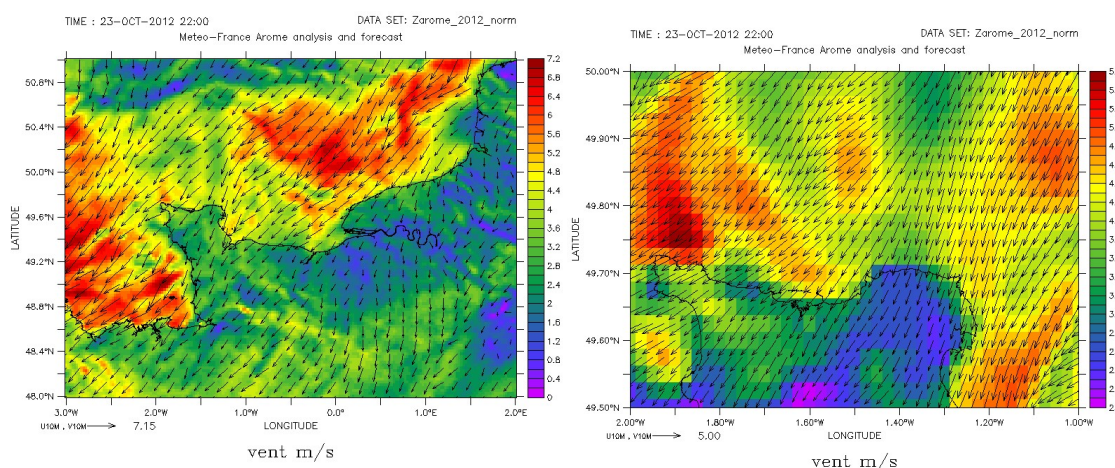


## ▪ Initialisation

La trajectoire d'un ensemble de particules est simulée afin de prendre un compte le phénomène d'étalement et l'incertitude sur la position initiale de la bouée, dans une maille à 200 m. Typiquement, un ensemble de particules est lâché sur un disque de 200 m de diamètre, avec une immersion constante d'un mètre. Ces particules sont soumises aux mêmes contraintes que le flotteur. Cette répartition génère ainsi 120 particules par lâchers, qui sont advectées individuellement par le modèle MARS.

## ▪ Forçage météorologique

Les données de forçages atmosphériques sont issues du modèle de Météo-France AROME, dont la résolution est d'environ 2 km, et disponibles à pas de temps horaire (**Figure 21**).



**Figure 21** : Forçage météorologique à l'aide des données du modèle AROME (Météo-France) (pleine résolution à droite).

## ▪ Forçage des débits des rivières

A partir de la base de données des rivières (banque Hydro), les rivières les plus importantes ont été renseignées pour les périodes de simulation souhaitées : la Seine ( $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), l'Orne ( $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), l'Eure ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), la Vire ( $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), la Douve ( $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), la Risle ( $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), le Couesnon ( $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), la Sélune ( $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

## ▪ Paramètres de calibration

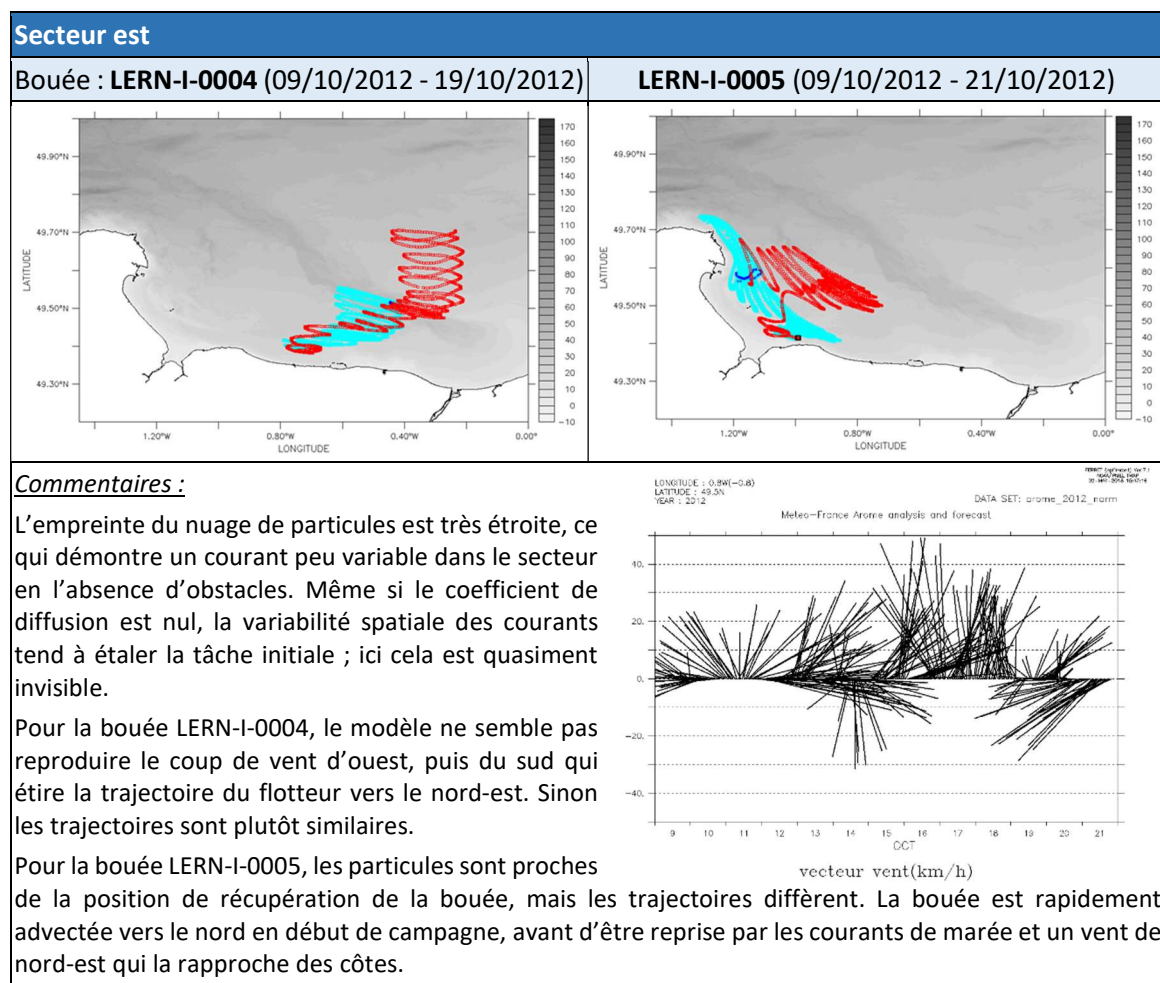
De nombreuses simulations ont été réalisées en faisant varier un ou plusieurs paramètres, ce qui a permis de mettre en lumière leur influence sur le calcul de trajectoire. Les principaux paramètres intervenants plus spécifiquement dans le calcul de trajectoire sont listés ci-dessous :

- ↳ **Forçage météo** : Le forçage ayant la plus haute résolution disponible (2 km) a été sélectionné.
- ↳ **Formulation du coefficient d'entraînement par le vent (drag coefficient)** : Le vent soufflant à la surface de l'eau exerce sur la pellicule d'eau superficielle une force de frottement qui dépend de la densité de l'air, la vitesse du vent, de la « rugosité » de la surface de la mer (plus ou moins lisse, en fonction de l'agitation, des vagues), de la stratification thermique, etc... le mouvement des couches superficielles est propagé vers le bas par viscosité turbulente. Plusieurs choix sont proposés dans MARS, entre une valeur constante du paramètre (*cds*) et une valeur fonction de la vitesse du vent. C'est ce deuxième choix qui est fait, et la formulation de Poon & Madsen a été ajoutée.
- ↳ **Hauteur des vagues (effet sur la rugosité)** : Une hauteur de vague d'un mètre a été choisie (peu d'influence).

- ↪ **Viscosité turbulente horizontale** : Un ajustement du paramètre *fvisc* permet d'obtenir une valeur de la viscosité de d'environ  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .
- ↪ **Résolution verticale (niveaux sigmas)** : Plusieurs discrétisations ont été testées, mais n'ont pas contribué à améliorer la comparaison (15 niveaux sigmas, raffinés en surface, 30 niveaux sigmas généralisés). Il a donc été décidé de rester sur une configuration à 10 niveaux sigmas, légèrement raffinés près de la surface.
- ↪ **Modèle de fermeture turbulente** : Le modèle à une équation de l'énergie cinétique turbulente, et le modèle de Prandtl ont été testés, sans apporter une amélioration irréfutable. Ceci d'autant plus que le modèle actuel de fermeture turbulente de type *k-eps*, plus réaliste, est repris dans la globalité des configurations du code MARS.
- ↪ **Coefficient de diffusion horizontale** : Ce coefficient n'intervient ici que pour la marche aléatoire des particules (random walk), visant à simuler l'étalement lié à la diffusion. N'ayant pas un grand intérêt pour améliorer la précision du modèle, sa valeur est laissée à zéro.

### 3.3.2 Résultats de la calibration

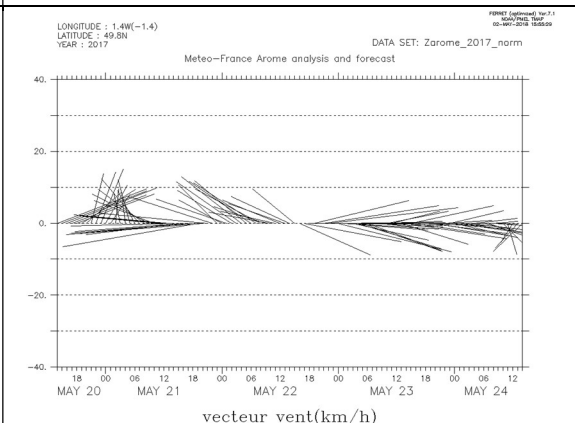
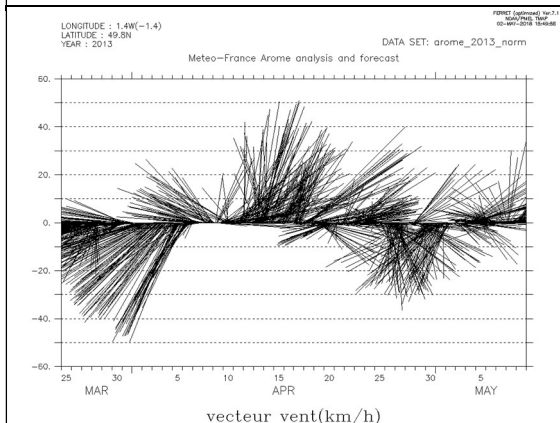
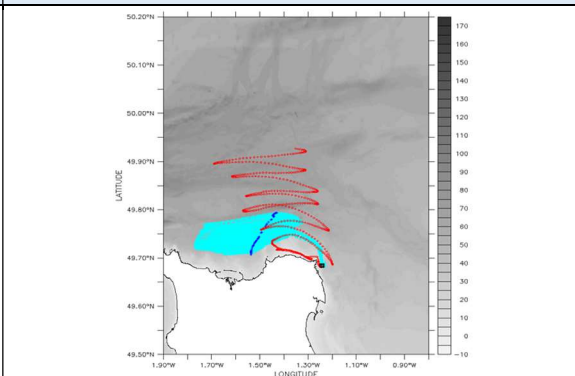
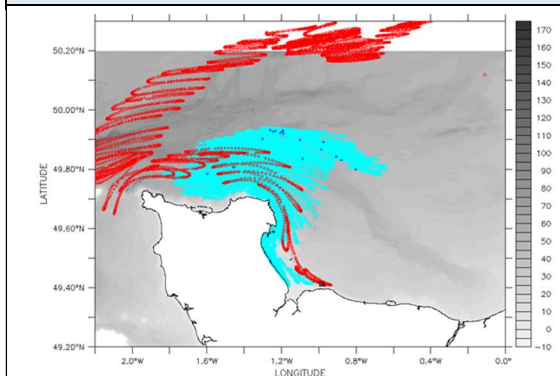
Les figures suivantes représentent la trace du flotteur (en rouge) et de l'empreinte laissées par les particules en mouvement dans le modèle (en bleu clair) et leur position finale (en bleu foncé).



## Secteur nord

Bouée : LERN-I-0005 (28/03/2013 - 09/05/2013)

LERN-I-0002 (20/04/2017 - 24/04/2017)

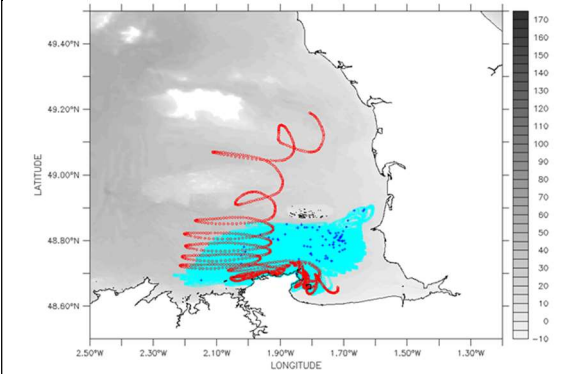
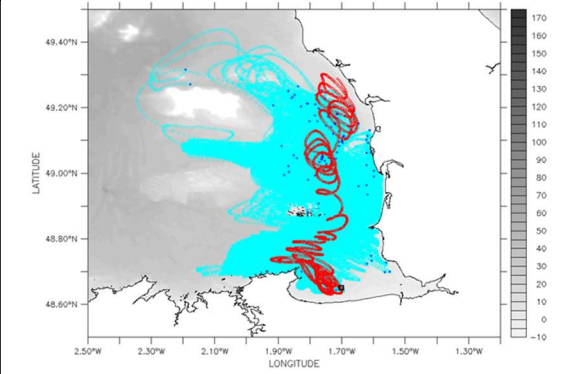
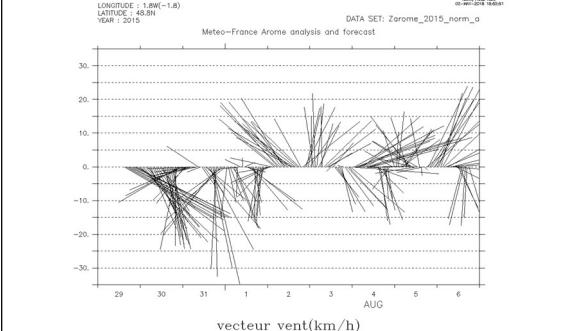
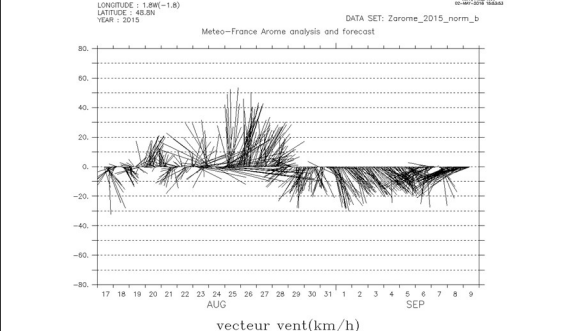


### Commentaires :

La simulation de 2013 couvre **plus d'un mois**, il est donc peu étonnant que les positions finales soient différentes. Cependant, il est à noter la même tendance du modèle à ne pas reproduire les coups de vent susceptibles de pousser le flotteur vers le nord. En début de lâcher, le vent de nord-est ramène la bouée à la côte, ce que confirme le modèle. En milieu de lâcher, les vents de sud poussent la bouée vers le nord, mais cela est bien moins prononcé dans le modèle. Au bout d'un mois, le nuage de particules est plus dispersé que pour les simulations précédentes.

### Commentaires :

La simulation de la bouée LERN-I-0002, bien que de courte durée, n'est pas très convaincante. Pour la même raison que précédemment ; le nuage de particules n'est pas réellement poussé vers le nord, même si les vents sont plus faibles, mais la dispersion horizontale est très étirée du nord au sud. Il apparaît ici clairement que les courants à la côte peuvent contenir des veines de courants étroites que la résolution du modèle ne peut reproduire ; les premières heures de la campagne montrent une bouée longeant la côte, tandis que le nuage de points est entraîné vers le large.

Secteur ouest	
Bouée : LERN-I-0002 (30/07/2015 - 06/08/2015)	LERN-I-0003 (17/08/2015 - 01/09/2015)
	
<p>LONGITUDE : 1.8W(-1.8) LATITUDE : 48.9N YEAR : 2015</p> <p>DATA SET: Zarome_2015_norm_a</p> <p>Meteo-France Arome analysis and forecast</p>  <p style="text-align: center;">vecteur vent(km/h)</p>	<p>LONGITUDE : 1.8W(-1.8) LATITUDE : 48.9N YEAR : 2015</p> <p>DATA SET: Zarome_2015_norm_b</p> <p>Meteo-France Arome analysis and forecast</p>  <p style="text-align: center;">vecteur vent(km/h)</p>
<p><b>Commentaires :</b></p> <p>La trajectoire de la bouée est fortement accélérée en fin de lâcher, ce qui n'est pas correctement simulé. Les particules sont plus dispersées que dans les secteurs précédents. Le nuage s'est déplacé plutôt à l'Est, en face de Granville. La dispersion de ces particules révèle l'extrême variabilité des courants dans le secteur, notamment en raison des pointes et îles. Des particules initialement à moins de 200 m les unes des autres peuvent se retrouver à plusieurs dizaines de kilomètres dans des directions opposées. Les 4 derniers jours, un vent de sud-ouest pourtant modéré pousse la bouée au niveau de Jersey en 48 h.</p>	<p><b>Commentaires :</b></p> <p>Pour la bouée LERN-I-0003, d'une durée d'une vingtaine de jours, la comparaison est bien meilleure. Le nuage de particules est bien remonté. Bien que le nuage soit étalé, le barycentre est largement remonté. Le coup de vent de sud était cette fois plus fort (autour du 25/08) et a advecté le nuage au nord.</p>

### 3.3.3 Résumé de la calibration

Il semble que pour des vents modérés (< 30 km/h), la bouée puisse être entraînée plus rapidement vers le large que dans le modèle. Quand le vent dépasse 40 km/h, l'entraînement de la couche de surface est tel qu'il ajoute au déplacement des particules une composante liée au vent.

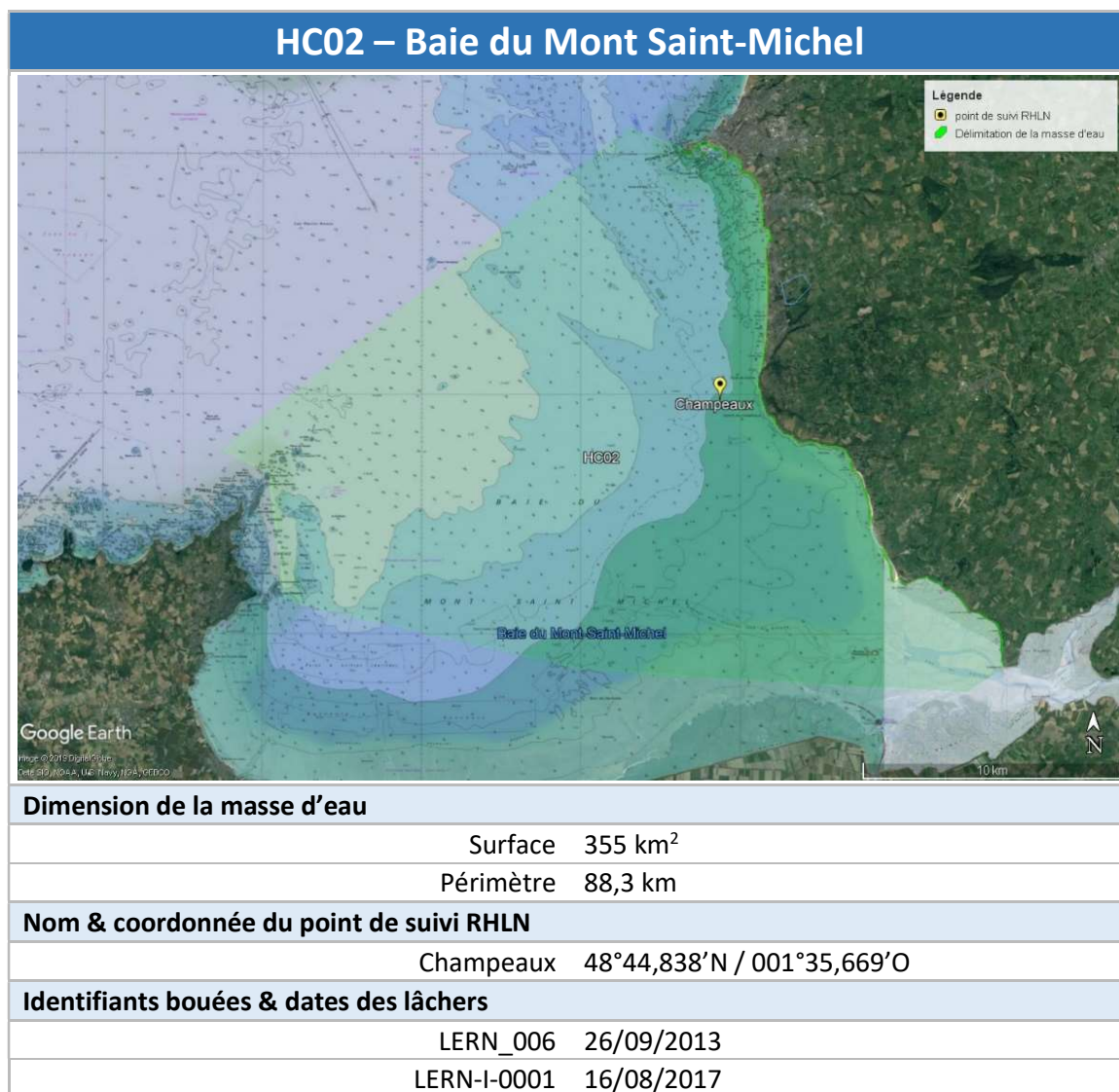
Par ailleurs, il semble que les lâchers depuis les bords de côte soient soumis à des courants très localisés. La résolution du modèle est trop grossière pour reproduire correctement les courants très côtiers et peu profonds. Cette limite peut être pénalisante si une bouée est entraînée très tôt par ce genre de courant.

L'exercice de validation par trajectoire de flotteurs sur des périodes assez longues, et dans des zones côtières où le vent peut être irrégulier peut s'avérer périlleux, si la résolution du modèle ou des forçages n'est pas suffisante. Cependant, à l'échelle de quelques jours le modèle reste fiable, plus encore pour des substances dissoutes, pour lesquelles l'effet moyenné sur la verticale du vent est moindre.

## 4 Comparaison des trajectoires réelles et simulées

### 4.1 Présentation des résultats par secteurs

#### 4.1.1 Secteur : Baie du Mont Saint-Michel

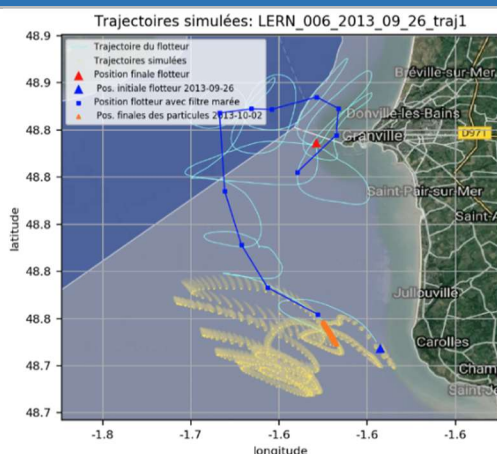


## LERN\_006

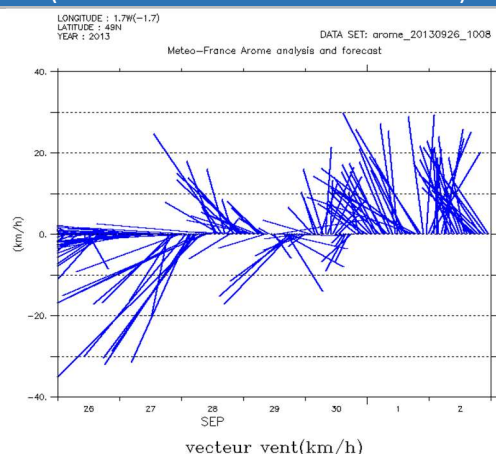
Dates	26/09/2013 - 02/10/2013 (T = 7 jours)
Position de mise à l'eau	48°44,9011'N / 1°35,6173'O
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	S
Temps passé dans la masse d'eau	67 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,40 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,54 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	5,95 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)

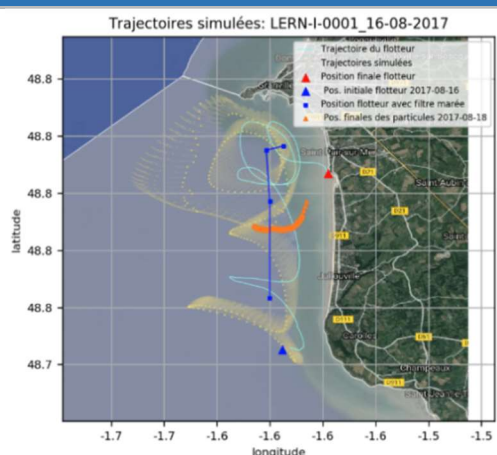


## LERN-I-0001

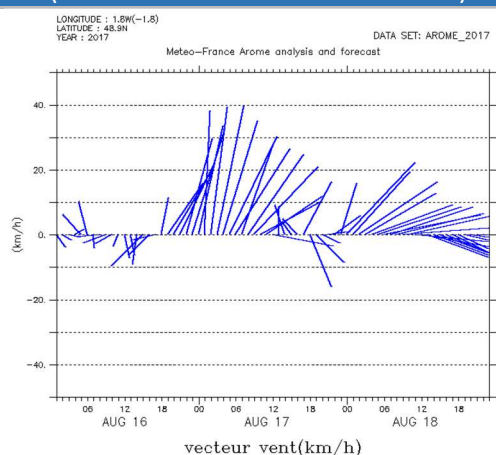
Dates	16/08/2017 - 18/08/2017 (T = 2 jours)
Position de mise à l'eau	48° 44,788'N / 1° 35,478'O
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	N
Temps passé dans la masse d'eau	51,2 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,31 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	1,62 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	3,89 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Moyen

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## Commentaires HC02

Avec une superficie de 355 km<sup>2</sup>, HC02 est la plus grande des masses d'eau étudiées. C'est pourquoi, avec des vitesses moyennes de dérive relativement faibles (0,36 nœuds), le temps passé par les bouées n°0006 et n°0001 lâchées au point Champeaux est relativement important, avec respectivement 67 et 51,2 heures.

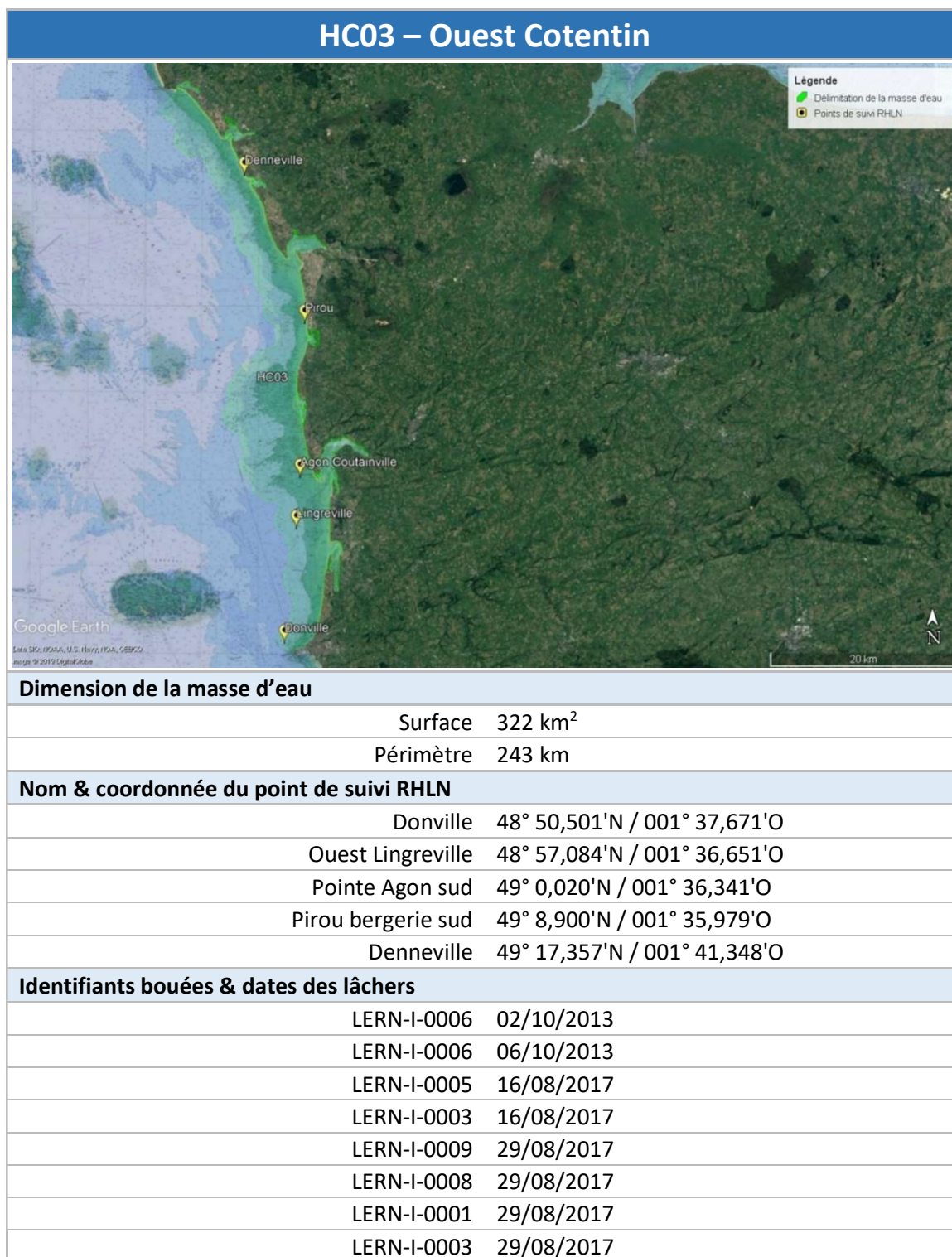
Le vent de Nord-Est a fait dériver la bouée (0006) au large. Grâce au courant, elle est remontée vers le Nord-Ouest pour sortir des masses d'eau HC02 et HC03. Puis, la marée paraît forcer la trajectoire, provoquant ainsi son retour vers l'Est.

Les vents de Sud-Ouest ont rapidement entraîné la bouée (0001) vers la pointe de Granville. Sa trajectoire est revenue vers la côte du fait de la rotation sensible du vent à l'Ouest, ayant pour effet de piéger la bouée sous la pointe de Granville et de la repousser vers le Sud-Est.

Il semble que le modèle n'ait pu reproduire la remontée rapide de la bouée (0006) vers le Nord-Est sous l'action du vent à partir du 30 septembre. Les particules entraînées au centre de la masse d'eau sont moins mobiles sur la deuxième partie de la simulation, et restent à la limite bathymétrique de l'estran. En revanche, en l'absence de vent (début de la simulation), puis d'un fort coup de vent de Sud-Ouest, le modèle reproduit bien la trajectoire de la bouée (0001).

Sous ces conditions de vent particulières, les eaux de la baie du Mont Saint Michel transitent devant la pointe de Granville. Le point de Donville (HC03) étant situé près de la frontière de la masse d'eau HC02, il peut être considéré comme influencé par les eaux provenant du secteur de Champeaux.

#### 4.1.2 Secteur : Ouest Cotentin





## LERN-I-006

Dates 02/10/2013 - 06/10/2013 (T = 4 jours)

Position de mise à l'eau 48°50,4634'N / 1°37,7461'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne N

Temps passé dans la masse d'eau 34 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,83 nœuds

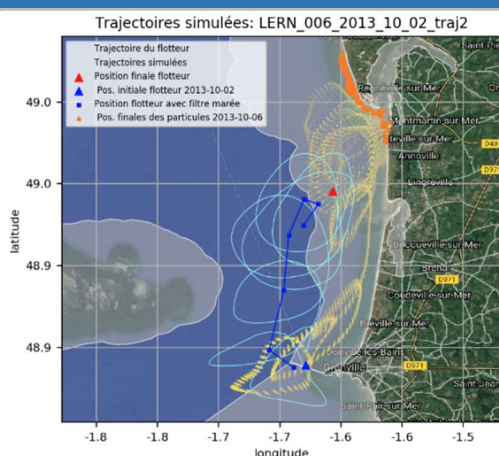
Distance filtrée de la marée / jour 1,64 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 4,69 milles nautiques

Etalement du nuage de points Moyen

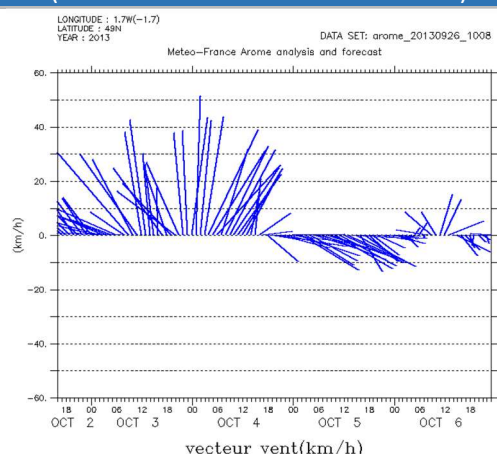
### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local

(modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0005

Dates 16/08/2017 - 20/08/2017 (T = 4 jours)

Position de mise à l'eau 48° 50,606'N / 1° 37,421'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne NNO

Temps passé dans la masse d'eau 17,7 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,40 nœuds

Distance filtrée de la marée / jour 1,32 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 2,95 milles nautiques

Etalement du nuage de points Fort

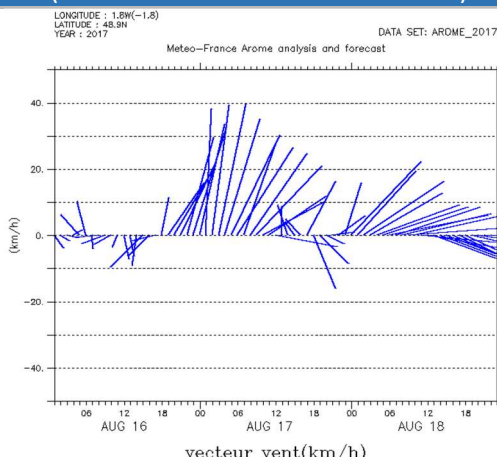
### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local

(modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0003

Dates 16/08/2017 - 18/08/2017 (T = 2 jours)

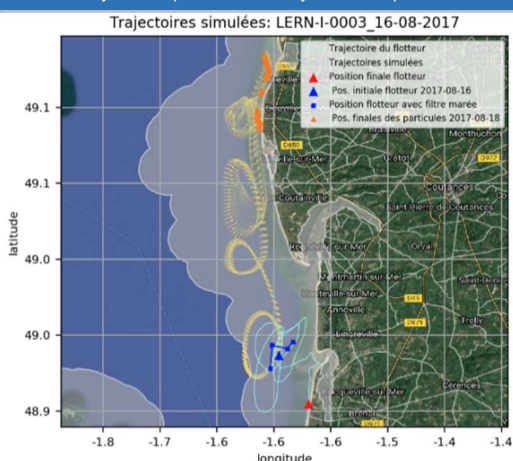
Position de mise à l'eau 48° 56,302'N / 1° 35,685'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

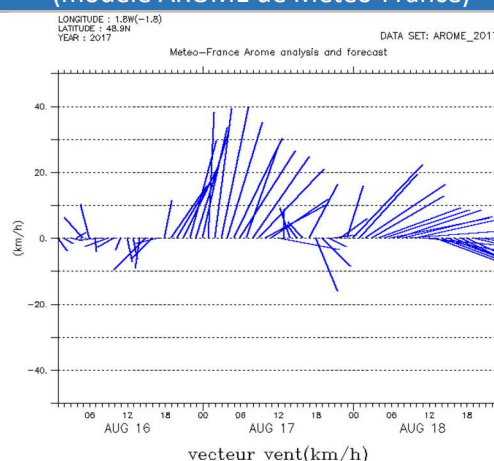
Direction moyenne	NNO
Temps passé dans la masse d'eau	54 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,46 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,54 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	0,65 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Moyen

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0009

Dates 29/08/2017 - 31/08/2017 (T = 2 jours)

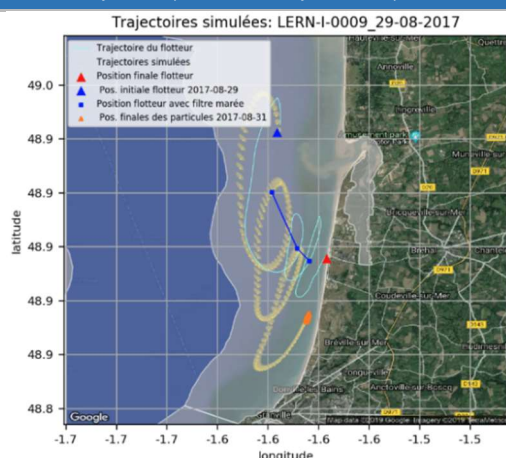
Position de mise à l'eau 48° 56,593'N / 1° 35,657'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

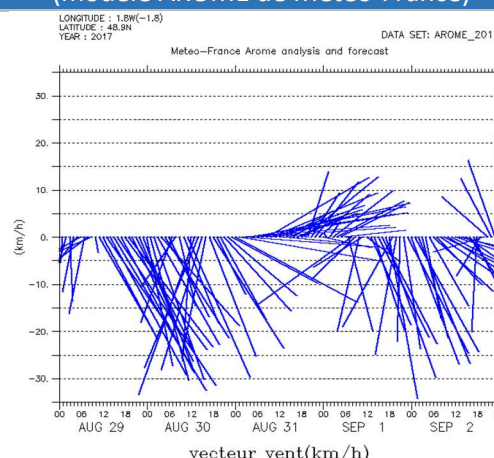
Direction moyenne	S
Temps passé dans la masse d'eau	38 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,31 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	1,62 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	La bouée a dérivé moins de 48h
Etalement du nuage de points	Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0006

Dates 06/10/2013 - 07/10/2013 (T = 2 jours)

Position de mise à l'eau 48°57,0748'N/ 1°36,5788'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne N

Temps passé dans la masse d'eau 15 h

Vitesse moyenne de la bouée 1,05 nœud

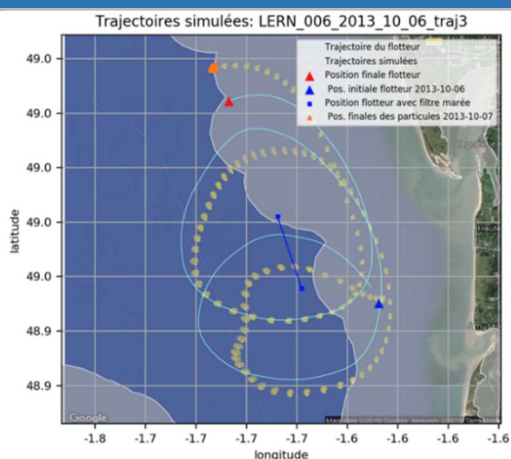
Distance filtrée de la marée / jour 4,24 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive *La bouée a dérivé moins de 48h*

Etalement du nuage de points Faible

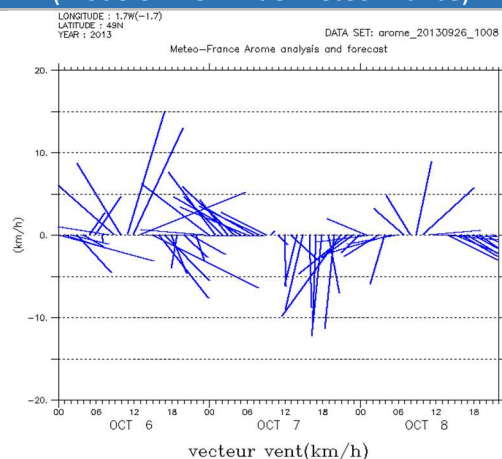
### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local

(modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0008

Dates 29/08/2017 - 31/08/2017 (T = 2 jours)

Position de mise à l'eau 48° 59,203'N / 1° 36,268'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne S

Temps passé dans la masse d'eau 51,5 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,35 nœuds

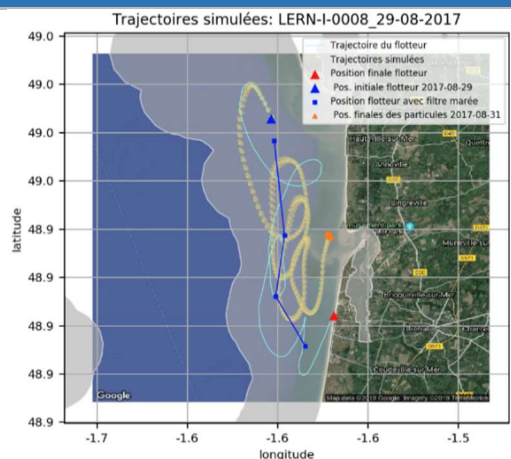
Distance filtrée de la marée / jour 2,16 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 5,91 milles nautiques

Etalement du nuage de points Faible

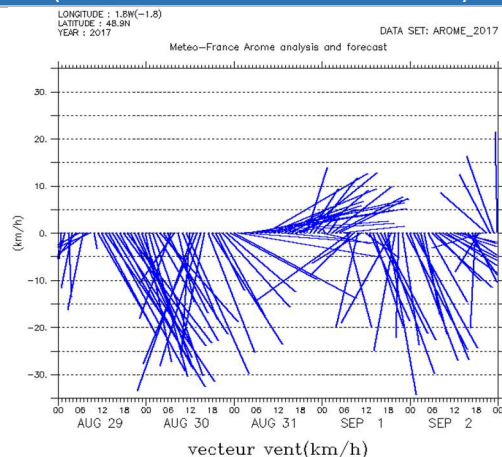
### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local

(modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0003

Dates 29/08/2017 - 01/09/2017 (T = 3 jours)

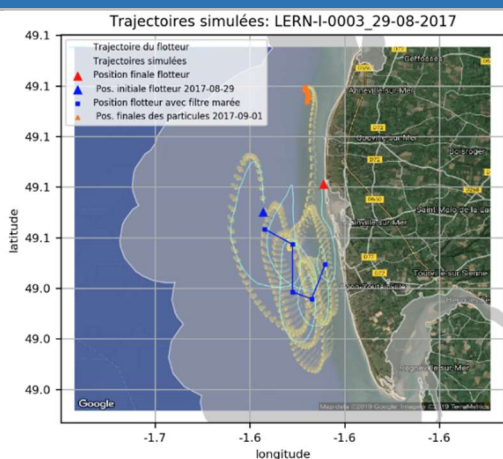
Position de mise à l'eau 49° 04,263'N / 1° 38,541'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

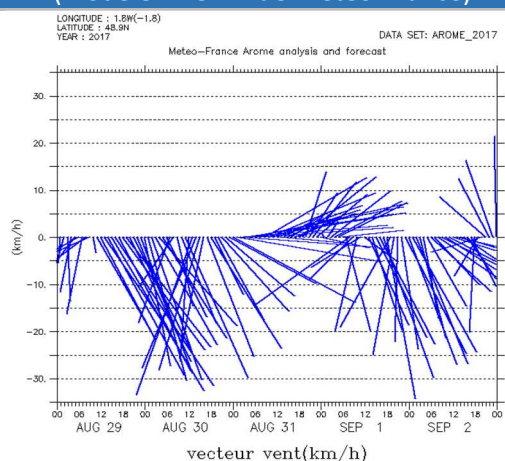
Direction moyenne	0
Temps passé dans la masse d'eau	66 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,34 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,46 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	2,53 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0001

Dates 29/08/2017 - 02/09/2017 (T = 4 jours)

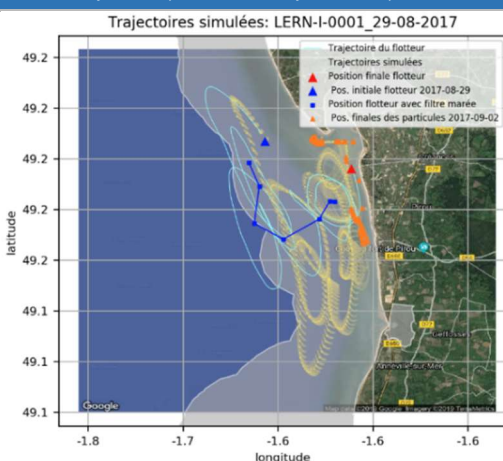
Position de mise à l'eau 49° 12,481'N / 1° 39,439'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

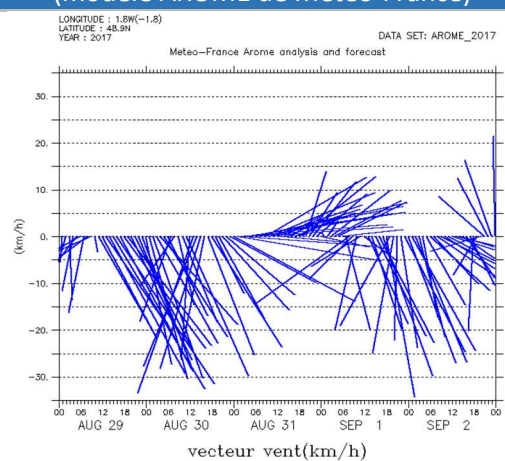
Direction moyenne	NO
Temps passé dans la masse d'eau	82,3 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,38 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,54 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	3,22 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Moyen

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



### Commentaires HC03

Avec une surface de 322 km<sup>2</sup> pour un périmètre de 243 km, HC03 est incontestablement la masse d'eau côtière la plus étendue du bassin Seine-Normandie. Elle a été suivie sur 5 points RHLN sur un axe Nord/Sud, et aujourd'hui sur 3 points (Donville, Ouest Lingreville, Denneville).

Le point « Donville » est positionné en limite Sud de la masse d'eau. La première bouée lâchée (0006) sur ce point a dérivé une partie du temps hors de la masse d'eau, à mi-chemin entre la côte et les Iles Chausey. La circulation est dominée par la marée, avec des ellipses très arrondies et de grande amplitude, contrairement aux oscillations aplaties observées au Nord du Cotentin. La seconde bouée (0005) déployée s'est déplacée vers le Sud tandis que le vent a soufflé majoritairement depuis le Sud-Ouest. A marée montante, la pointe de Granville constitue un obstacle contraignant la bouée à dériver à la frontière des masses d'eau HC02 et HC03. Elle est finalement repoussée à la côte, et longe celle-ci vers le Sud, forcée par un vent d'Ouest.

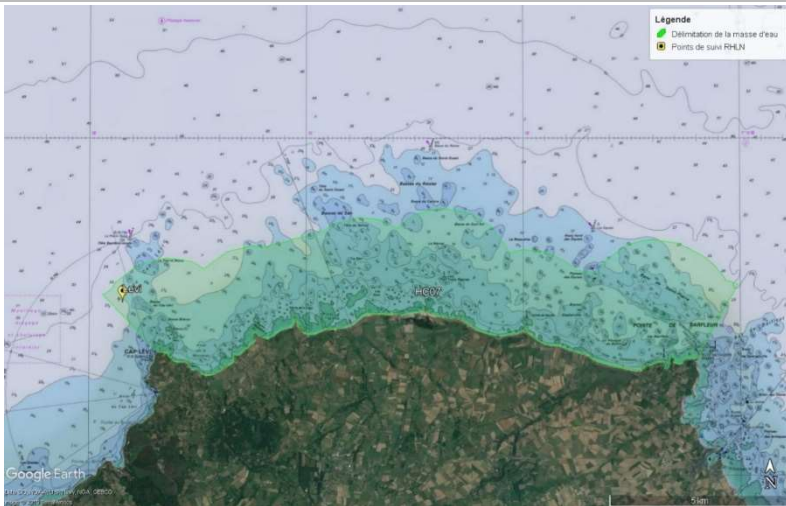
Le point « Lingreville » est positionné au large du havre de la Vanlée. Contrairement aux résultats du modèle, la première bouée (0003) ne semble pas soumise à l'influence du vent de Sud relativement soutenu (~20 nœuds). En effet, les particules sont rapidement entraînées vers le Nord et la dispersion du nuage est faible alors que la distance entre la bouée et sa position initiale est de seulement 4 km après 48 heures de dérive. Le second lâcher (0009) a eu lieu pendant une période de morte eau. Le vent prédomine alors sur la dérive résiduelle et repousse la bouée au Sud-Est de sa position initiale. Avec des vents relativement faibles lors du troisième lâcher, la bouée (0006) a suivi des oscillations circulaires vers le Nord induites par la marée. Lors de la marée descendante, la bouée s'éloigne de la côte puis à marée montante, sa trajectoire revient de nouveau à l'intérieur de la masse d'eau. La distance moyenne journalière filtrée de la marée est très importante (4,24 milles nautiques), preuve d'une dérive forte dans ce secteur. Le modèle paraît bien reproduire cette trajectoire.

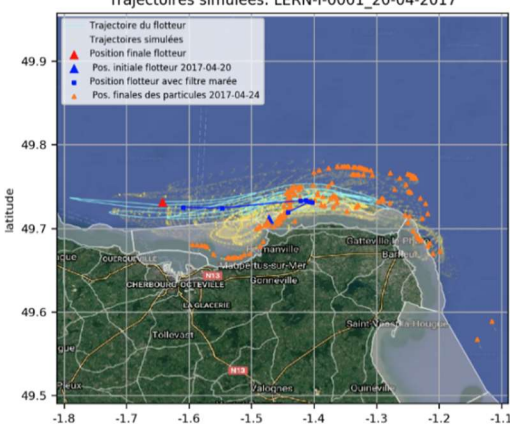
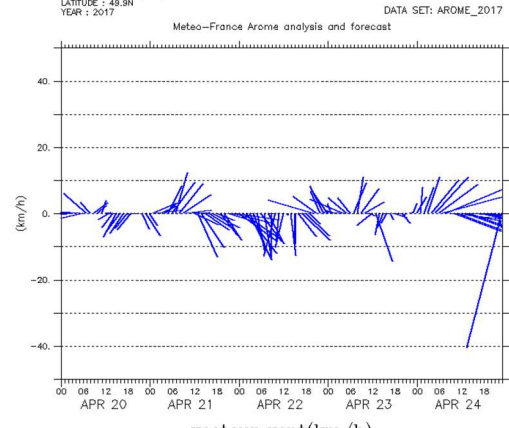
La bouée (0008) mise à l'eau au point « Pointe Agon sud » a majoritairement subi un vent modéré de Nord-Ouest. Les trajectoires des particules simulées et celle de la bouée sont cohérentes. La dispersion du nuage est faible, ce qui traduit une homogénéité des courants dans la zone. Dans ces conditions de vent, le modèle paraît fiable.

La dérive vers le Nord de la bouée (0003) déployée à 5 milles au Nord du point « Pointe Agon sud » est très faible. Le rapport entre la distance réellement parcourue et la distance filtrée de la marée traduit l'importance des excursions de marée par rapport à la dérive résiduelle et l'effet du vent. Le nuage des particules simulées se comporte de manière identique. Son étalement est faible et traduit l'homogénéité des courants dans ce secteur. Avec un vent dominant de Nord-Ouest, la bouée est maintenue à la même latitude.

La bouée (0001) lâchée devant le havre de St Germain-sur-Ay, à proximité du point « Pirou Bergerie sud », est maintenue près des côtes en raison des vents dominants de Nord-Ouest qui s'opposent à des courants de marée puissants. Son temps passé dans la masse d'eau est le plus important des 8 bouées déployées dans la masse d'eau HC03 (82,3h). La distance filtrée de la marée ainsi que la dispersion des particules simulées sont faibles, traduisant ainsi l'homogénéité des courants.

### 4.1.3 Secteur : Nord Cotentin

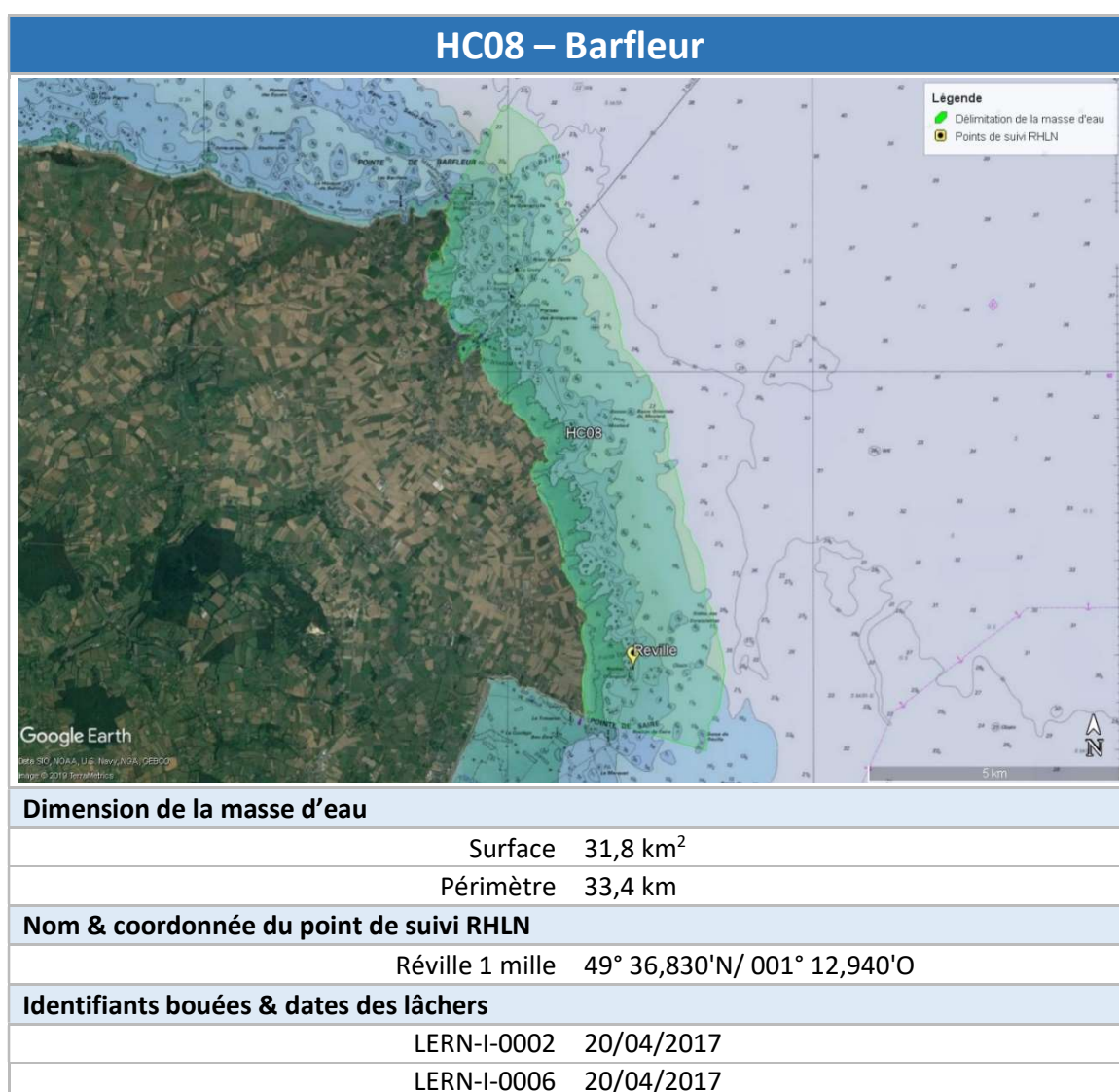
HC07 – Cap Lévy - Gatteville	
	
<b>Dimension de la masse d'eau</b>	
Surface	44,9 km <sup>2</sup>
Périmètre	42,6 km
<b>Nom &amp; coordonnée du point de suivi RHLN</b>	
Nord Ouest Lévi	49° 42,548'N / 001° 29,225'O
<b>Identifiants bouées &amp; dates des lâchers</b>	
LERN-I-0001	20/04/2017

LERN-I-0001	
Dates	20/04/2017 - 24/04/2017 (T = 3 jours)
Position de mise à l'eau	49°42,7847'N / 1°28,3100'O
Indicateurs de la trajectoire de la bouée	
Direction moyenne	O
Temps passé dans la masse d'eau	10,2 h
Vitesse moyenne de la bouée	1,53 nœud
Distance filtrée de la marée / jour	1,75 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	1,9 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Fort
Trajectoire réelle de la bouée & simulée	Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)
<i>Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées</i>	
<b>Trajectoires simulées: LERN-I-0001_20-04-2017</b> 	<small>LONGITUDE : 1.4W(-1.3) LATITUDE : 49.8N YEAR : 2017</small> <small>DATA SET: AROME_2017</small> 

### Commentaires HC07

Comme le confirme le nuage de points simulés, la dispersion est importante dans ce secteur à forts courants. Par conséquent, le temps de résidence de la bouée dans la masse d'eau est faible (10,2 h). Elle sort de la masse d'eau par le Nord après seulement un cycle de marée. Toutefois, le rapport important entre la distance intégralement parcourue et la distance résultante confirme que, par vent faible, la bouée s'éloigne peu du point initial. Même si le modèle reproduit difficilement la trajectoire réelle, les particules et la bouée sont rapidement écartées hors de la bande côtière. La masse d'eau HC60 ne semble influencée que faiblement par les eaux provenant de la masse d'eau HC07 dans sa partie Est.

#### 4.1.4 Secteur : Barfleur



## LERN-I-0002

Dates 20/04/2017 - 24/04/2017 (T = 3 jours)

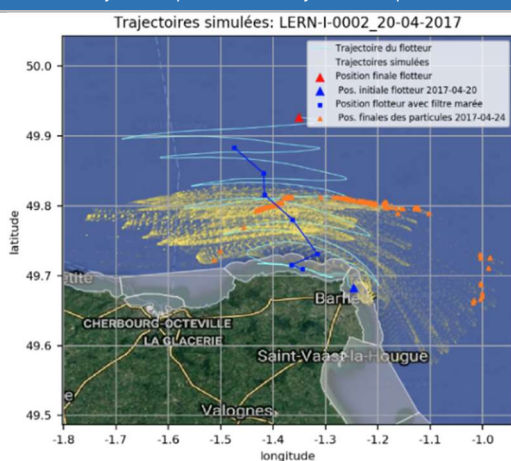
Position de mise à l'eau 49°41,0303'N / 1°14,6590'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

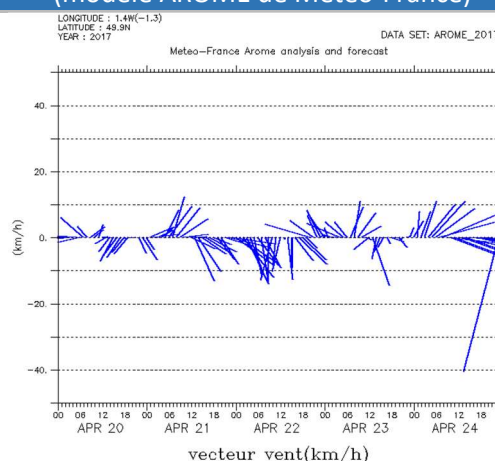
Direction moyenne	N
Temps passé dans la masse d'eau	7,8 h
Vitesse moyenne de la bouée	1,75 nœud
Distance filtrée de la marée / jour	3,90 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	14,01 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Moyen

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0006

Dates 20/04/2017 - 27/04/2017 (T = 6 jours)

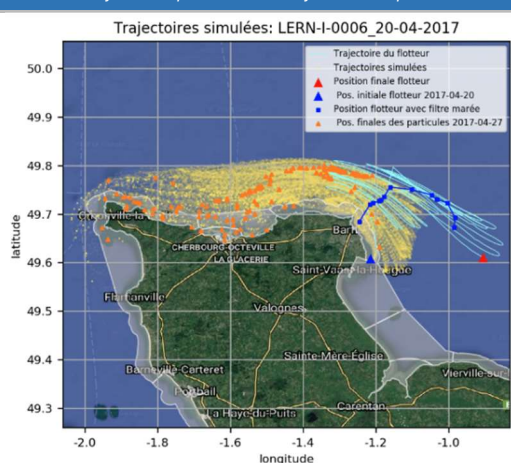
Position de mise à l'eau 49°36,5060'N / 1°12,9377'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

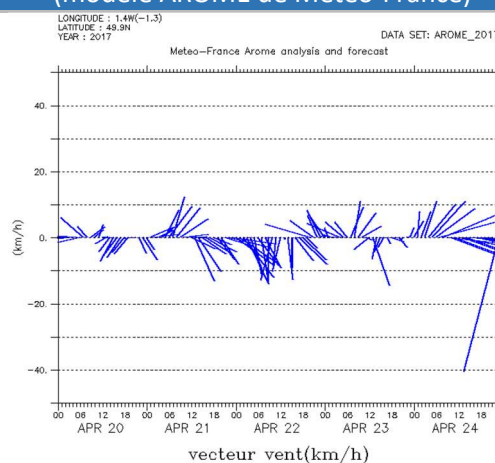
Direction moyenne	E
Temps passé dans la masse d'eau	2,9 h
Vitesse moyenne de la bouée	2,04 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	1,77 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	11,41 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Fort

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



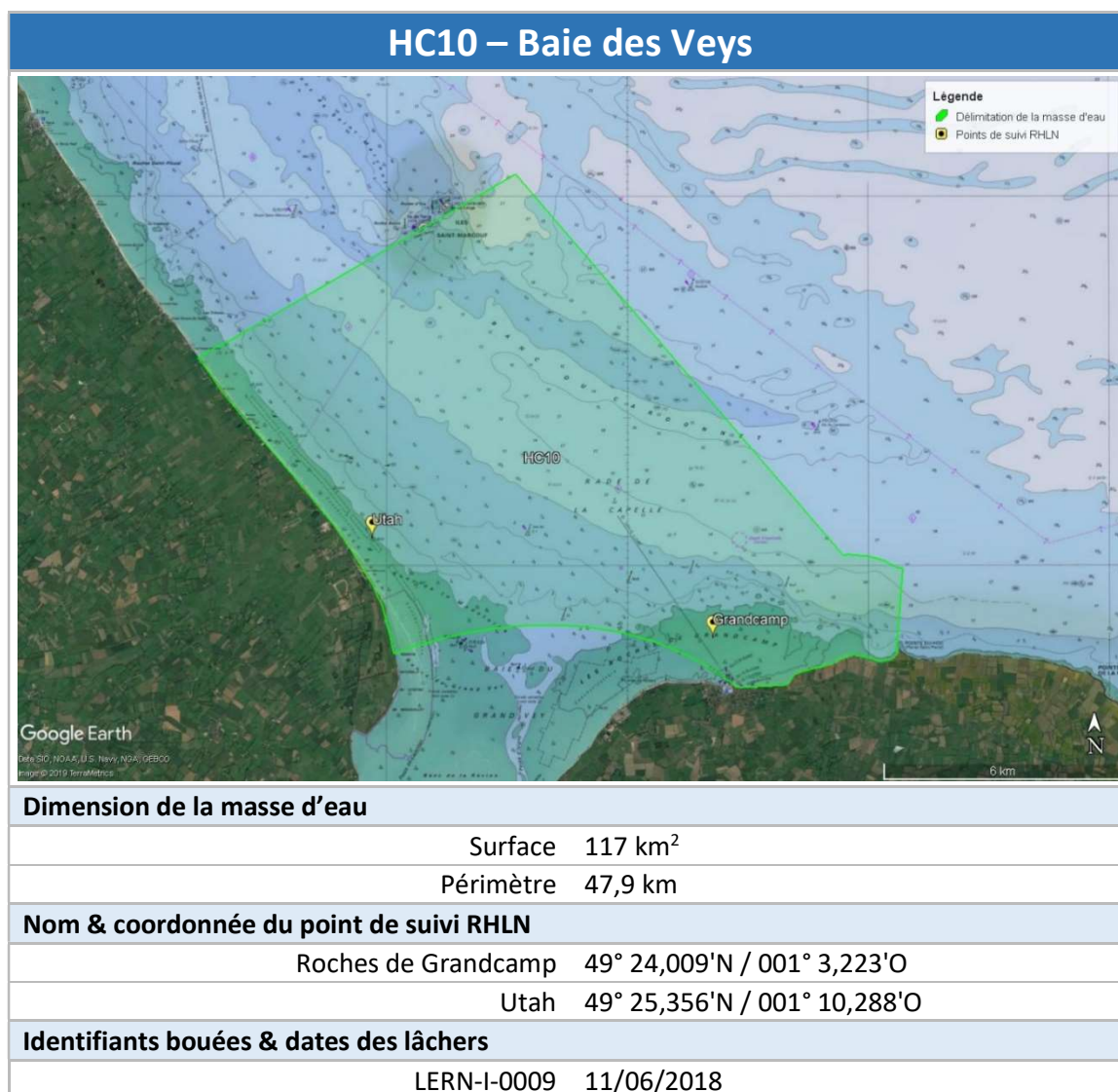


### Commentaires HC08

Les bouées (0002 & 0006) ont été déployées presque simultanément aux limites Nord et Sud respectivement, de la masse d'eau HC08. Ces deux bouées ainsi que les particules simulées se sont rapidement éloignées de la côte en conservant des oscillations importantes d'Est en Ouest. Tous les indicateurs confirment un hydrodynamisme fort dans ce secteur. Les temps de résidence des bouées dans la masse d'eau HC08 sont par conséquent très faibles (< 8 h), et le rapport entre les distances parcourues et les distances filtrées de la marée sont forts.

Bien que le modèle sous-estime la dérive et surestime la dispersion des particules, les résultats sont cohérents avec la réalité de ce secteur. La dérive est de préférence dirigée vers le large, et la dispersion est très importante en raison des forts courants.

#### 4.1.5 Secteur : Baie des Veys (HC10, HT06)

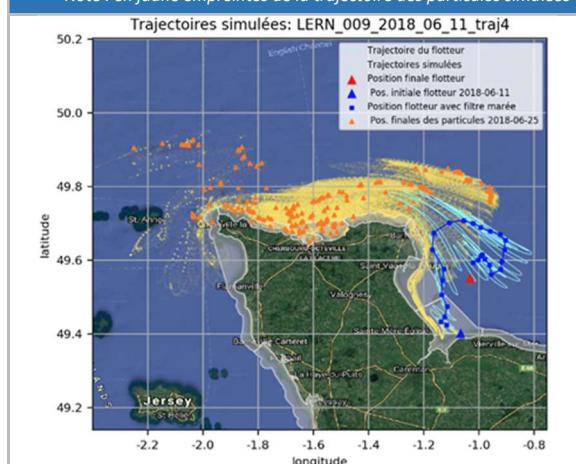


## LERN-I-0009

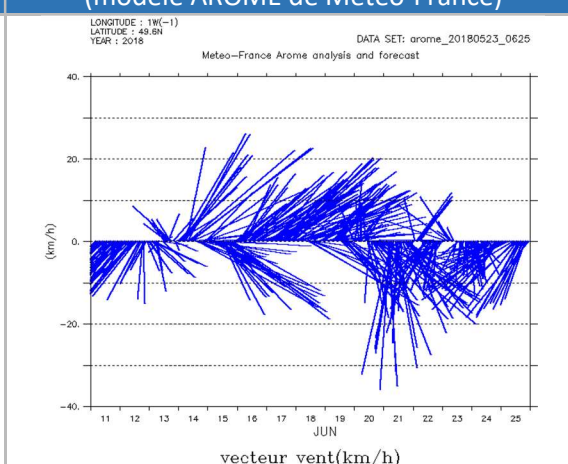
Dates	11/06/2018 - 25/06/2018 (T = 14 jours)
Position de mise à l'eau	49°24,2650'N / 1°04,0103'O
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	N
Temps passé dans la masse d'eau	51 h
Vitesse moyenne de la bouée	1,44 nœud
Distance filtrée de la marée / jour	0,64 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	3,68 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Fort

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



### Commentaires HC10

La bouée (0009) lâchée sur le point « Géfosse », en limite Sud-Est de la masse d'eau HC10, est remontée vers le Nord sous l'effet de la résiduelle de marée malgré un vent contraire de Nord-Est rencontré en début de trajectoire pendant 3 jours. Puis elle a été entraînée au large, vers le Nord-Est par un vent majoritairement de Sud-Ouest pendant 6 jours sans dépasser la latitude du cap de Barfleur. Enfin, l'enchaînement de vents provenant du Nord-Ouest au Nord-Est a ramené la bouée vers la zone initiale, décrivant ainsi un cercle.

Sur un total de 14 jours de suivi, la bouée est restée 51 heures dans la masse d'eau initiale. Ce temps de résidence est remarquable au vu de ce secteur à l'hydrodynamisme fort.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que cette trajectoire quasi-circulaire s'est faite géographiquement à la position du « gyre » de Barfleur.

La simulation fait apparaître une remontée des particules le long de la côte Est du Cotentin, donc sur une trajectoire plus à l'Ouest que celle de la bouée probablement plus sujette à l'influence du vent. Puis le nuage de particules a un comportement très dispersé, avec une fraction importante qui remonte jusqu'au cap de la Hague (HC04), ce qui confirme la puissance des courants le long de la côte Nord du Cotentin.

## HT06 – Baie des Veys : fond de baie



### Dimension de la masse d'eau

Surface	30,9 km <sup>2</sup>
Périmètre	34,3 km

### Nom & coordonnées du point de suivi RHLN

Géfosse	49° 23,470'N / 1° 6,360'O
---------	---------------------------

### Identifiants bouées & dates des lâchers

LERN-I-0008	23/05/2018
LERN-I-0009	23/05/2018

### LERN-I-0008

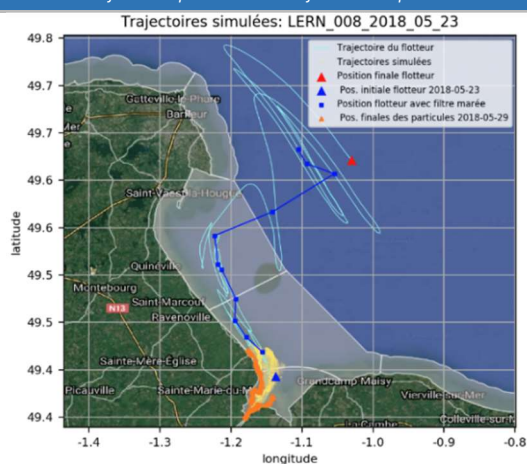
Dates	23/05/2018 - 29/05/2018 (T = 6 jours)
Position de mise à l'eau	49°23,6340'N / 1°08,2487'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne	NNE
Temps passé dans la masse d'eau	4 h
Vitesse moyenne de la bouée	1,03 nœud
Distance filtrée de la marée / jour	2,50 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	8,52 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Faible

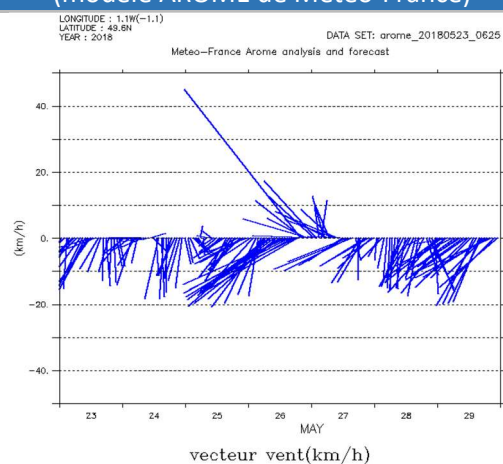
### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local

(modèle AROME de Météo-France)

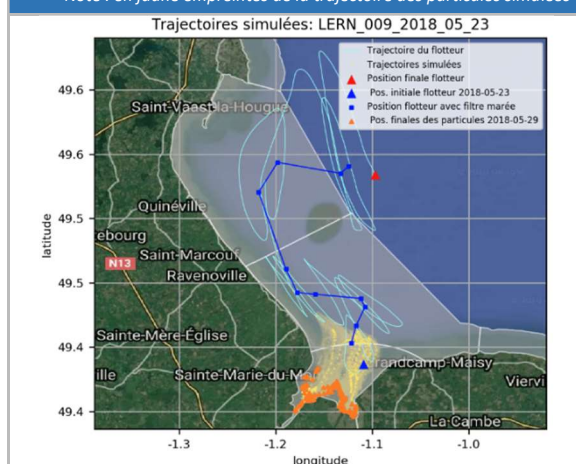


## LERN-I-0009

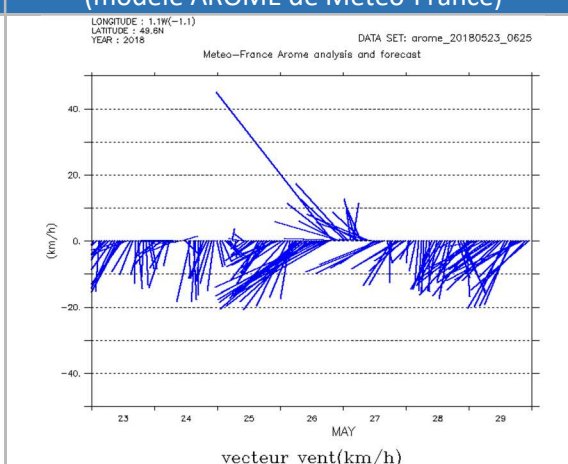
Dates	23/05/2018 - 29/05/2018 (T = 6 jours)
Position de mise à l'eau	49°23,3128'N / 1°06,4699'O
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	N
Temps passé dans la masse d'eau	11 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,81 nœud
Distance filtrée de la marée / jour	1,55 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	5,42 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Moyenne

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## Commentaires HT06

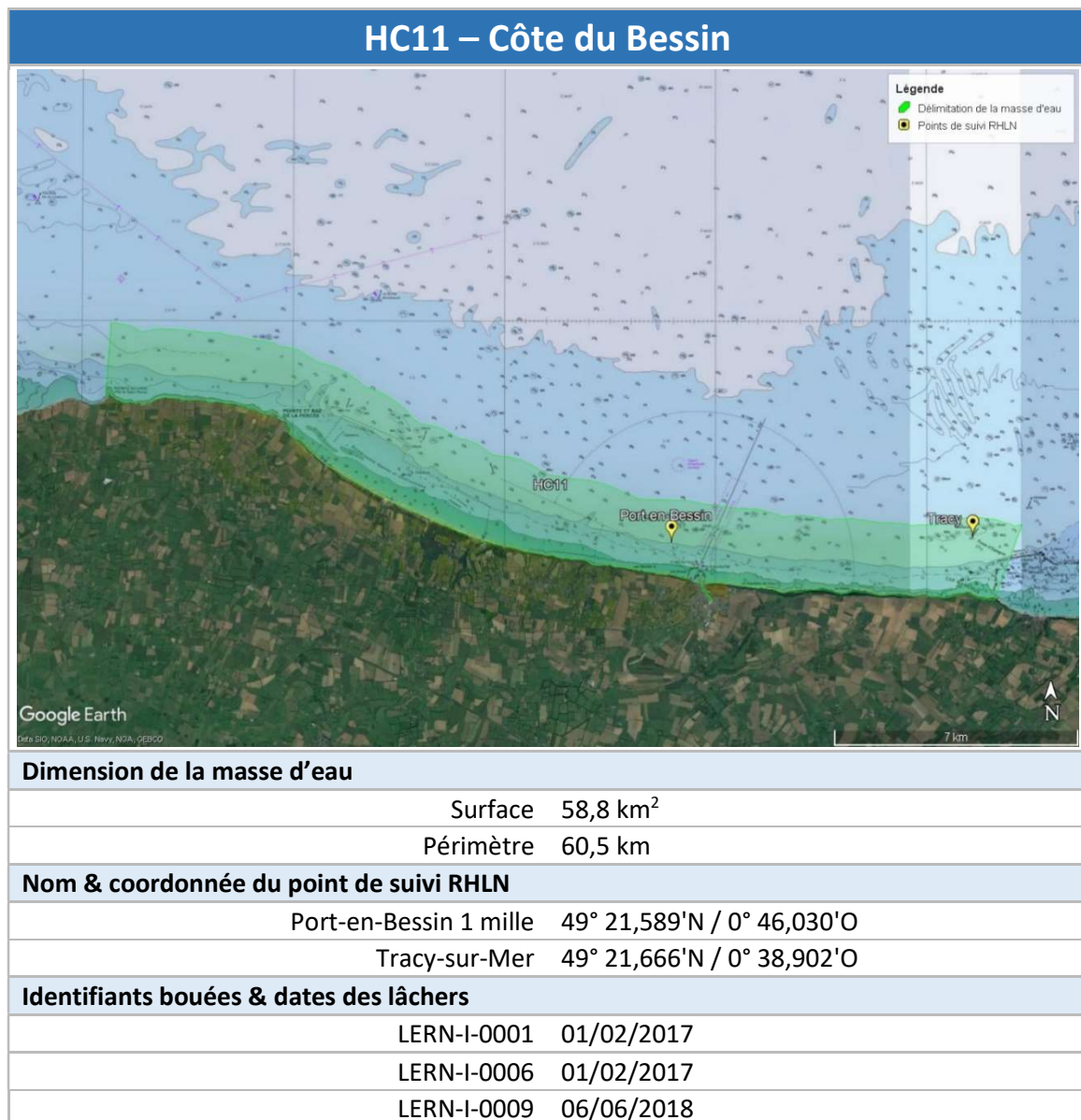
Les deux bouées (0008 & 0009) lâchées le même jour dans HT06 sont rapidement sorties de cette masse d'eau de transition (respectivement 4 h et 11 h de présence dans la masse d'eau), pour transiter par l'Ouest de la masse d'eau HC10 et remonter assez rapidement au Sud puis au large de la pointe de Saire, ceci malgré un vent défavorable de secteur Nord / Nord-Est. Ensuite, un coup de vent de Sud-Est a eu pour effet d'entraîner ces bouées vers le Nord.

Le ratio des distances totales parcourues et filtrées de la marée est de 10, car l'excursion de marée est bien observée malgré le vent, et leurs temps de résidence est d'environ deux cycles de marée.

En ce qui concerne les simulations, les nuages de particules sont restés bloqués dans la baie des Veys, à l'Est de celle-ci pour la bouée 0008, donc principalement en zone intertidale. Le modèle ne paraît donc pas capable de représenter les trajectoires des bouées lâchées dans ce secteur, probablement à cause d'un effet de stratification à certains moments de la marée, de circulations faibles et complexes, et enfin et surtout, en raison d'une résolution pas assez « fine » du modèle.

Il est important de noter que ces observations sur les trajectoires simulées et réelles des bouées, sont cohérentes avec celles précédemment faites lors du projet DILEMES (Le Gendre *et al.*, 2014).

#### 4.1.6 Secteur : Côte du Bessin (HC11)



## LERN-I-0001

Dates 01/02/2017 – 06/02/2017 (T = 5 jours)

Position de mise à l'eau 49°21,7198'N / 0°38,3000'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne NNO

Temps passé dans la masse d'eau 0,2 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,96 nœuds

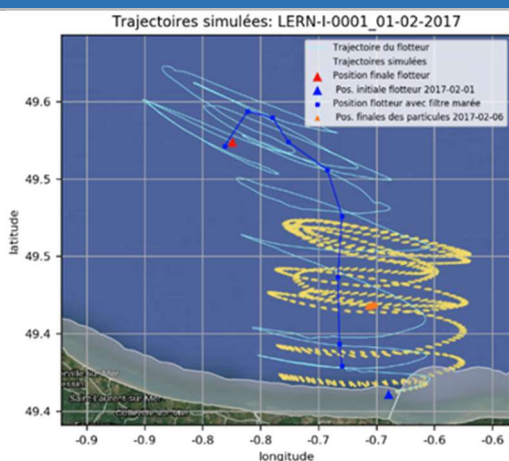
Distance filtrée de la marée / jour 2,09 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 8,77 milles nautiques

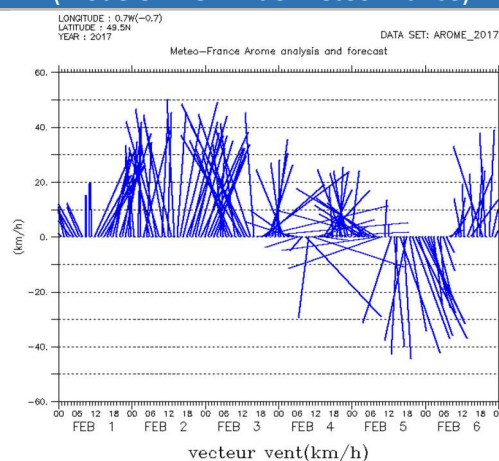
Etalement du nuage de points Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0006

Dates 01/02/2017 – 06/02/2017 (T = 5 jours)

Position de mise à l'eau 49°21,4910'N / 0°45,4530'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne NNO

Temps passé dans la masse d'eau 4,5 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,97 nœuds

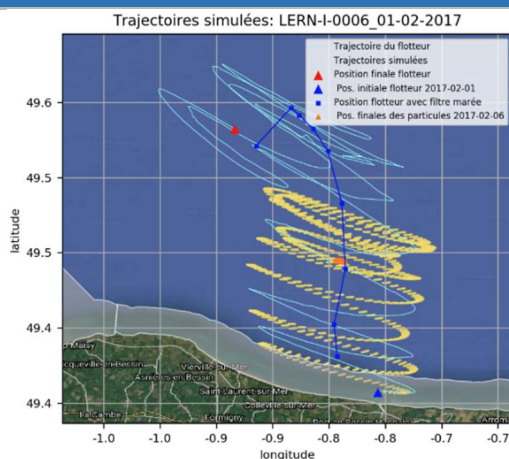
Distance filtrée de la marée / jour 2,57 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 8,87 milles nautiques

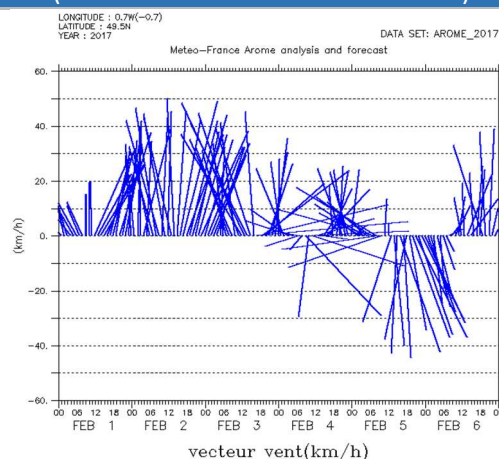
Etalement du nuage de points Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)

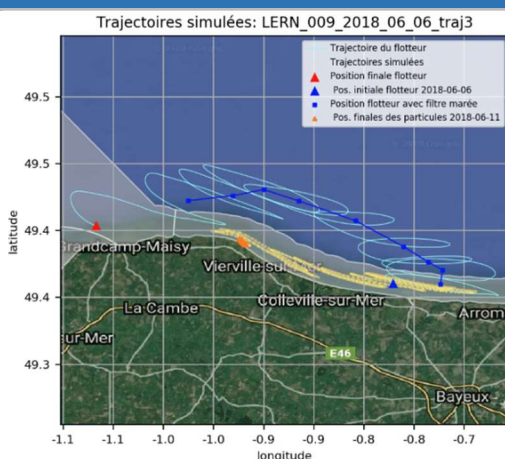


## LERN-I-0009

Dates	06/06/2018 - 11/06/2018 (T = 5 jours)
Position de mise à l'eau	49°21,6662'N / 0°46,1591'O
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	0
Temps passé dans la masse d'eau	23,2 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,76 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	2,40 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	1,80 milles nautiques
Étalement du nuage de points	Faible

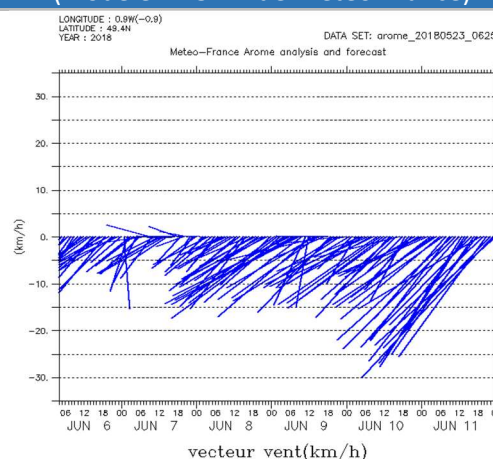
### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local

(modèle AROME de Météo-France)



## Commentaires HC11

Le point « Tracy-sur-Mer » est situé à l'extrême Est de la masse d'eau HC11. Avec un fort vent de terre (de dominante Sud), la bouée (0001) lâchée sur ce point a très rapidement quitté les limites de celles-ci totalisant seulement 0,2 h de présence dans la masse d'eau. Durant les deux derniers jours du suivi, la bouée est revenue vers le Sud avec la bascule du vent vers le Nord.

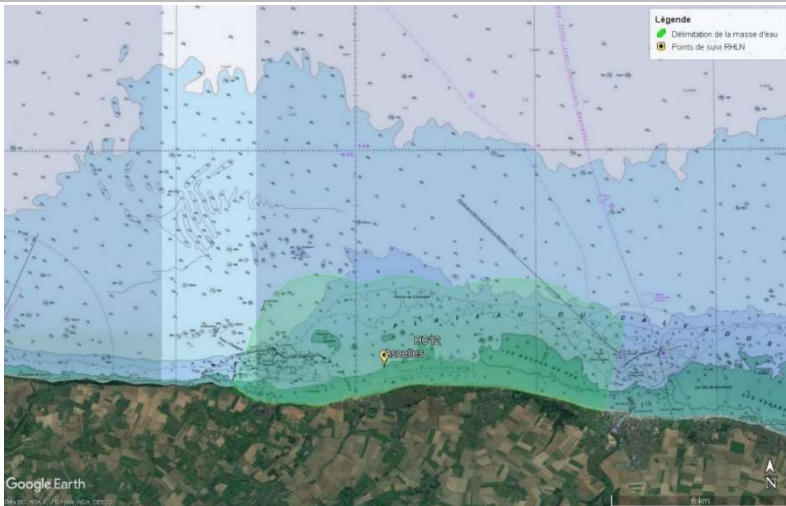
Malgré sa position plus proche de la côte, la bouée (0006) lâchée au point « Port-en-Bessin 1 mille » le même jour que la bouée (0001) a toutefois suivi la même trajectoire rapide vers le large, pour revenir vers le Sud au bout de 4 jours. Elle n'est restée que 4 heures dans cette masse d'eau.

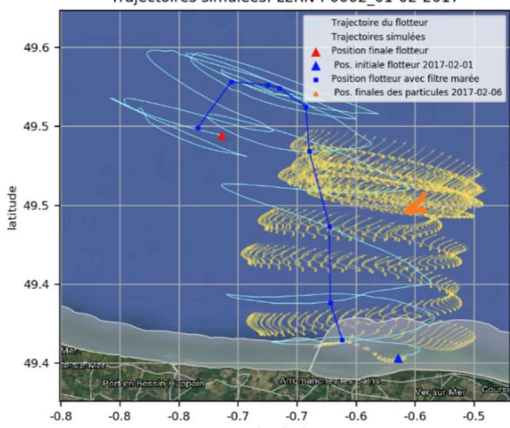
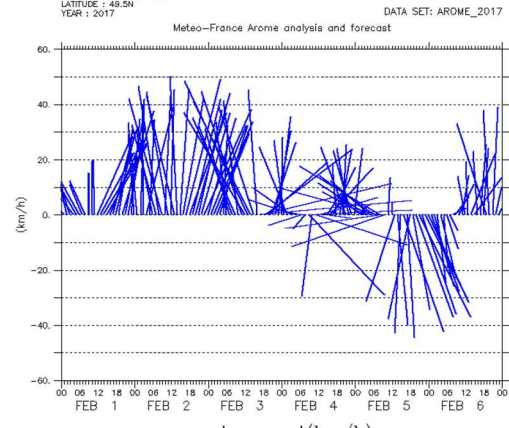
La troisième bouée (0009) lâchée également à proximité de Port-en-Bessin a fini sa trajectoire à l'Ouest dans la masse d'eau voisine (HC10). Elle a toujours subi un régime de vents constants de secteur Nord-Est soutenu, voire assez fort en fin de parcours. Son temps de résidence est cinq fois plus important que la bouée précédente.

Le modèle reproduit plutôt bien les trajectoires des bouées (0001) et (0006) ; le nuage de particules est peu dispersé. Toutefois, le forçage du vent en particulier près de la côte ne semble pas être suffisamment pris en compte, d'où une dérive moins importante vers le large. Dans les conditions du lâcher de la bouée (0009), le nuage de points des particules simulées est également entraîné vers l'Ouest, mais il est plaqué à la côte en fin de simulation, quand le vent se renforce et entre alors dans la zone de limite de validité du modèle.

De manière générale, les trajectoires dans la zone centrée sur le Calvados sont souvent mal représentées, probablement en raison : d'une part, d'un effet du vent surestimé, qui ramène tout à la côte quand le vent vient du Nord-Est ; et d'autre part, il semble y avoir une tendance pour la bouée à s'écarter rapidement de la côte.

#### 4.1.7 Secteur : Côte de Nacre (HC12, HC13)

HC12 – Côte de Nacre Ouest	
	
<b>Dimension de la masse d'eau</b>	
Surface	44,8 km <sup>2</sup>
Périmètre	31,8 km
<b>Nom &amp; coordonnée du point de suivi RHLN</b>	
Asnelles-Meuvoines	49° 21,080'N / 0° 34,208'O
<b>Identifiants bouées &amp; dates des lâchers</b>	
LERN-I-0002	01/02/2017

LERN-I-0002	
Dates	01/02/2017 - 06/02/2017 (T = 5 jours)
Position de mise à l'eau	49°21,2449'N / 0°33,8333'O
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	NNO
Temps passé dans la masse d'eau	7,8 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,96 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	2,00 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	8,96 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Moyen
<b>Trajectoire réelle de la bouée &amp; simulée</b> <i>Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées</i>	<b>Conditions de vent local</b> (modèle AROME de Météo-France)
Trajectoires simulées: LERN-I-0002_01-02-2017 	LONGITUDE : 0.7W(-0.7) LATITUDE : 49.5N YEAR : 2017 DATA SET: AROME_2017 Météo-France Arome analysis and forecast 

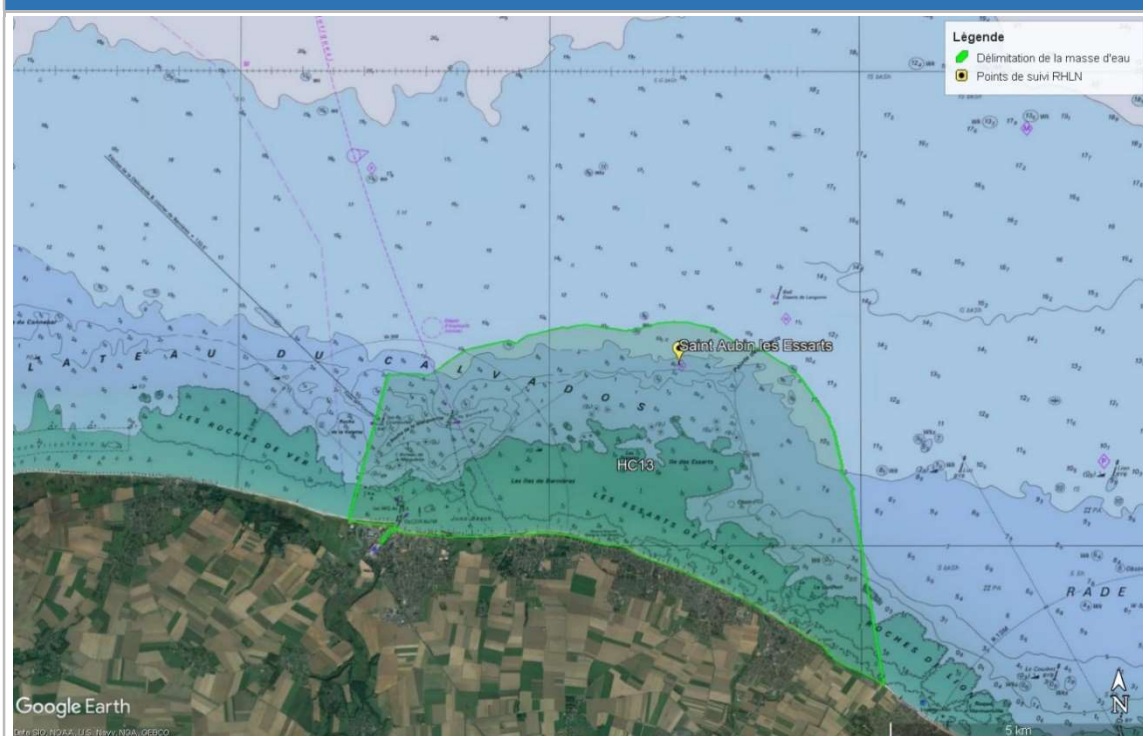


## Commentaires HC12

La bouée (0002) lâchée au point « Asnelles-Meuvinnes » (HC12) par vent de Sud-Ouest a eu une trajectoire comparable à celle lâchée au point « Tracy-sur-Mer » (voir ci-dessus), caractérisée par un éloignement rapide vers le Nord, puis un retour vers le Sud-Ouest suite au changement de direction du vent.

Les trajectoires simulées et réelles sont cohérentes entre elles, sauf en fin de parcours où la dérive rapide de la bouée vers le Nord-Ouest est mal représentée par le modèle. Dans ces conditions de vent de Sud, donc de terre, la masse d'eau HC12 entraînée vers le Nord n'influencerait donc que très peu la masse d'eau HC11.

## HC13 – Côte de Nacre Est



### Dimension de la masse d'eau

Surface 39,9 km<sup>2</sup>

Périmètre 30,1 km

### Nom & coordonnées du point de suivi RHLN

Saint Aubin-les Essarts 49° 21,899'N / 0° 22,907'O

### Identifiants bouées & dates des lâchers

LERN-I-0009 04/06/2018

## LERN-I-0009

Dates 04/06/2018 - 06/06/2018 (T = 2 jours)

Position de mise à l'eau 49°22,0340'N / 0°22,5485'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne 0

Temps passé dans la masse d'eau 2,5 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,74 nœuds

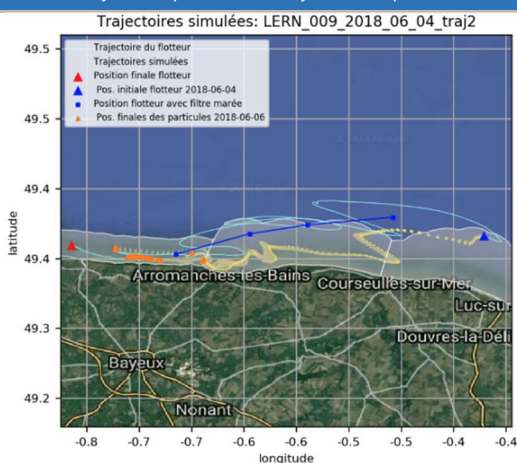
Distance filtrée de la marée / jour 6,65 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 12,72 milles nautiques

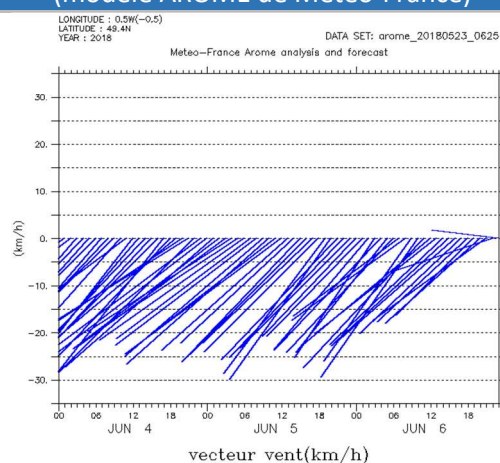
Etalement du nuage de points Moyen

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

*Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées*



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)

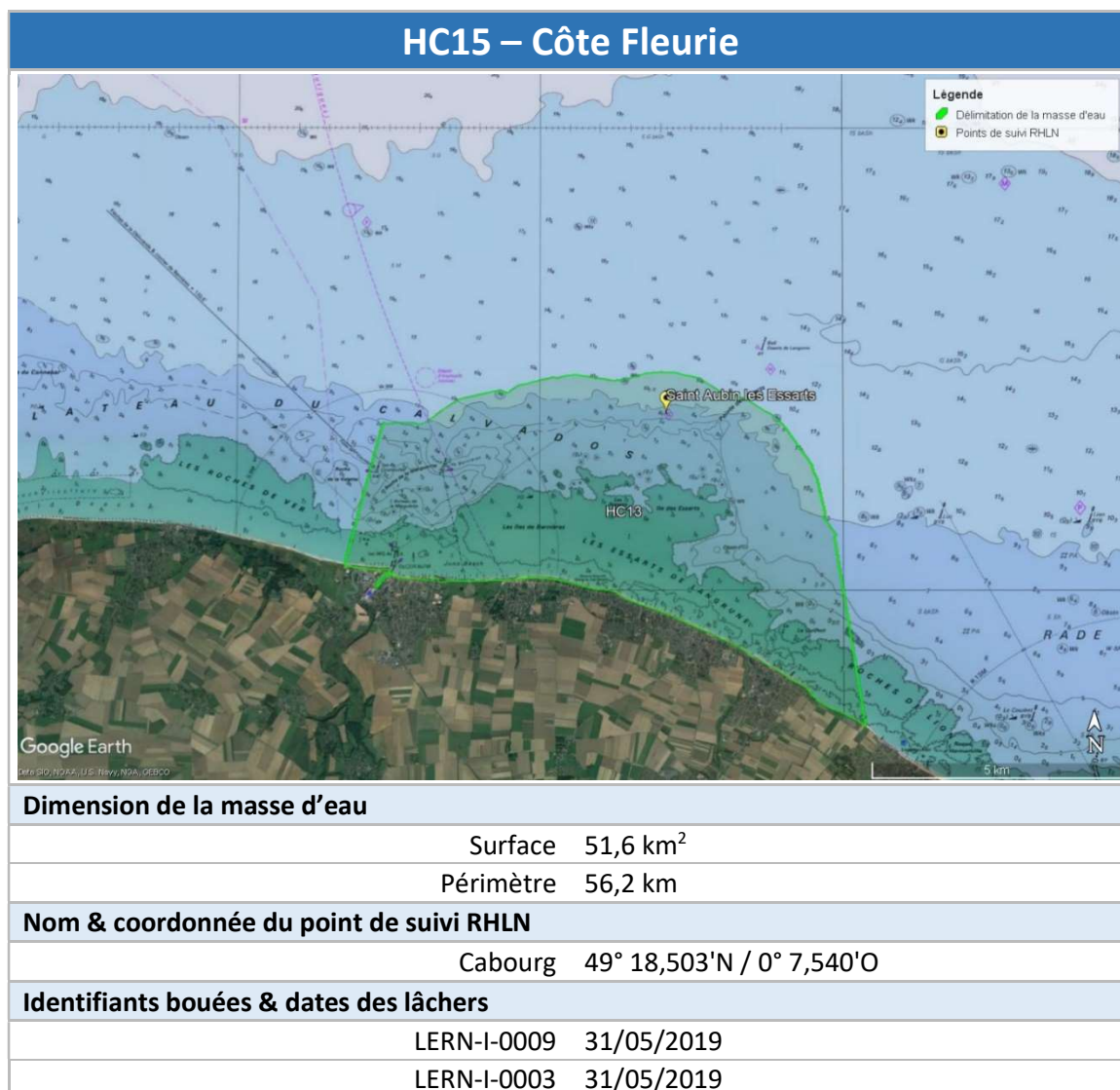


### Commentaires HC13

La bouée (0009) lâchée au point « Saint Aubin-les Essarts » a subi durant la totalité de la durée de son suivi des vents modérés de secteur Nord-Est. Elle a donc logiquement été entraînée vers l'Ouest, vers le secteur de Tracy-sur-mer (HC11), en traversant la masse d'eau HC12. L'importance et l'influence du vent sont confirmées par le faible rapport (proche de 3) de la distance totale parcourue sur la distance filtrée de la marée (6,65 mn/jour, le plus important de tous les lâchers du projet).

La trajectoire du nuage de particules simulées est proche de celle de la bouée, avec toutefois une tendance au rapprochement vers la côte plus marquée.

#### 4.1.8 Secteur : Côte Fleurie (HC15)



## LERN-I-0009

Dates 31/05/2018 - 04/06/2018 (T = 4 jours)

Position de mise à l'eau 49° 18,5767'N / 0° 7,540'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne 0

Temps passé dans la masse d'eau 15,5 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,68 nœuds

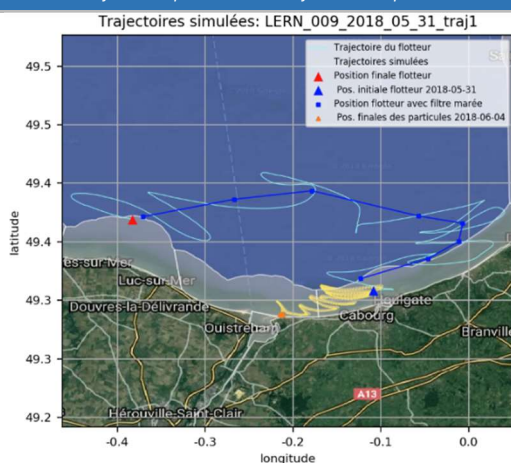
Distance filtrée de la marée / jour 2,84 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 5,02 milles nautiques

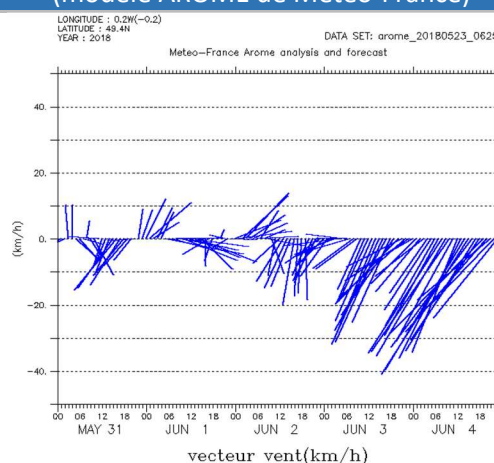
Etalement du nuage de points Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0003

Dates 31/05/2018 - 06/06/2018 (T = 6 jours)

Position de mise à l'eau 49° 20,8669'N / 0° 00,3740'O

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne 0

Temps passé dans la masse d'eau 1,3 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,56 nœuds

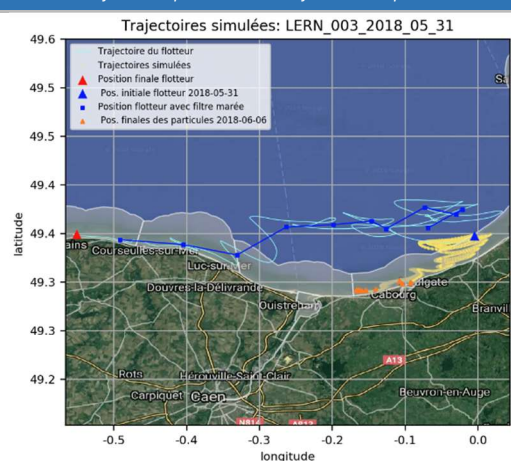
Distance filtrée de la marée / jour 3,72 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 2,12 milles nautiques

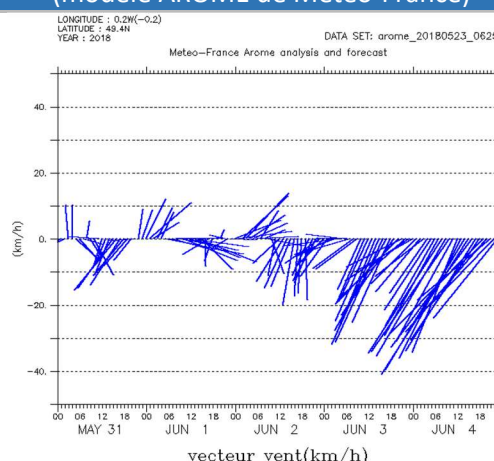
Etalement du nuage de points Moyen

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)

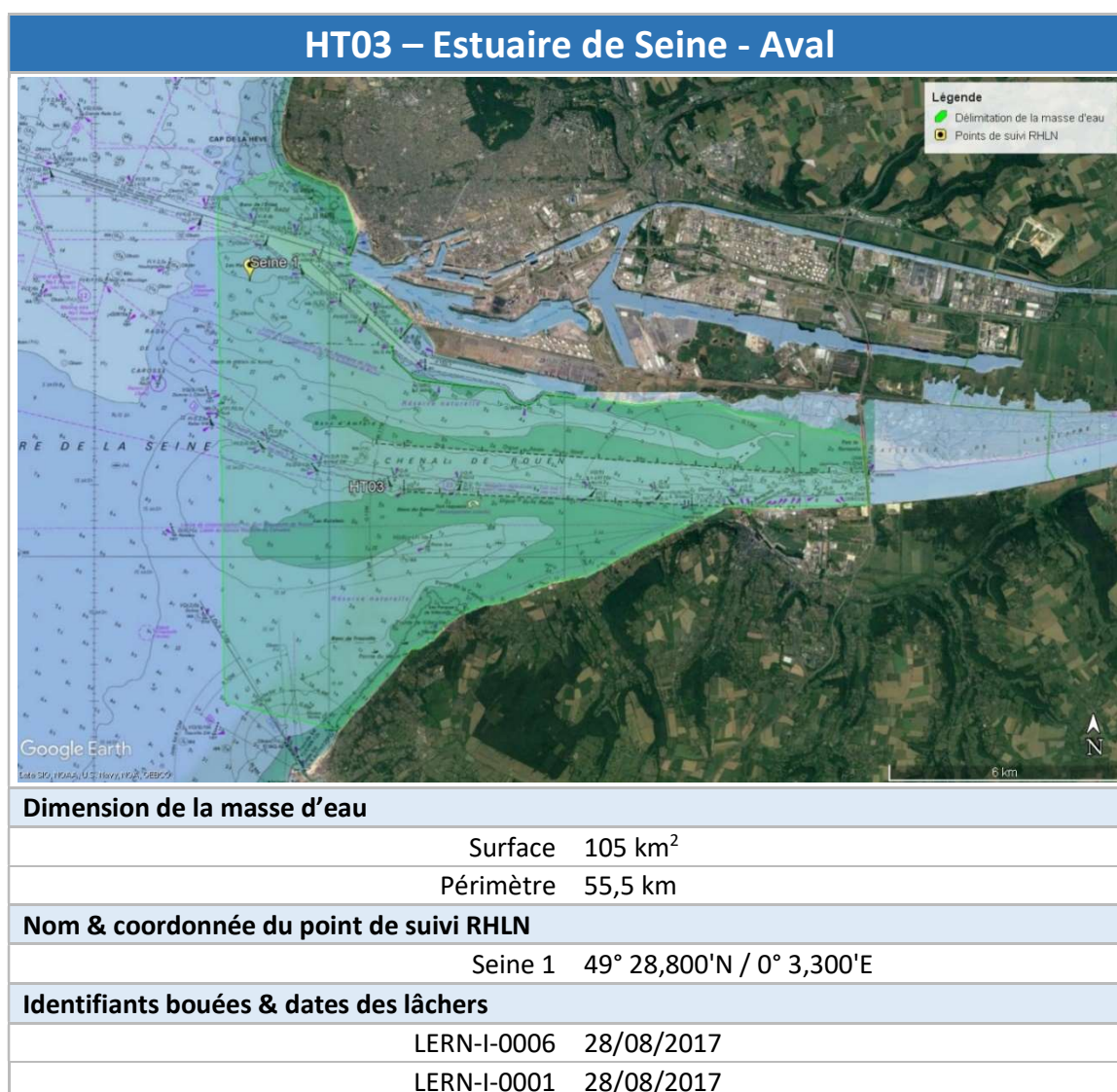


### Commentaires HC15

En début de trajectoire, la bouée (0009) déployée sur le point « Cabourg » est légèrement sortie de la masse d'eau, puis est revenue dans HC15, cumulant ainsi une durée de 15,5 heures à l'intérieur de celle-ci. Une seconde bouée (0003) a été lâchée au Nord-Est du point RHLN. Positionnée en bordure de la masse d'eau, son temps de résidence est inférieur à deux heures. Ensuite, des vents de secteur Nord-Est constants et soutenus ont entraîné ces deux bouées dans l'Ouest de leur position initiale, en finissant leur course dans HC13 pour la bouée (0009) et HC12 pour (0003).

En ce qui concerne les trajectoires simulées, le nuage de points des particules n'est ici pas du tout représentatif de la trajectoire réelle, et part même dans une direction opposée. Le modèle semble avoir des difficultés dans cette zone, avec des vents de Nord-Est qui poussent les particules à la côte.

#### 4.1.9 Secteur : Estuaire de Seine (HT03, HC16)



## LERN-I-0006

Dates 28/06/2017 - 29/06/2017 (T = 1 jour)

Position de mise à l'eau 49° 26,1533'N / 0° 03,7337'E

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne OSO

Temps passé dans la masse d'eau 12,1 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,55 nœuds

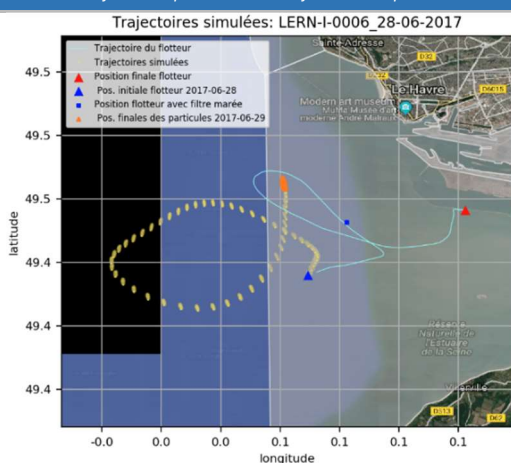
Distance filtrée de la marée / jour 4,42 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive *La bouée a dérivé moins de 48h*

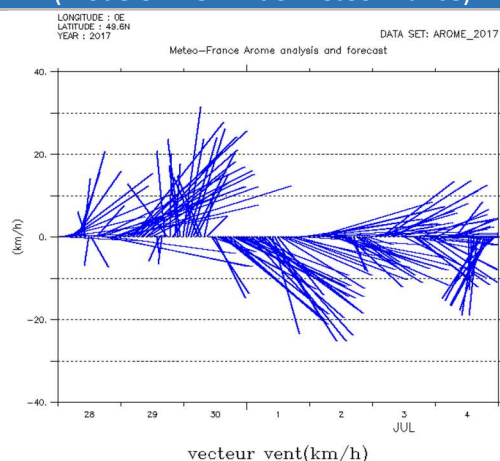
Etalement du nuage de points Faible

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

*Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées*



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## LERN-I-0001

Dates 28/06/2017 - 04/07/2017 (T = 6 jours)

Position de mise à l'eau 49° 23,524'N / 0° 3,750'E

### Indicateurs de la trajectoire de la bouée

Direction moyenne N

Temps passé dans la masse d'eau 15,8 h

Vitesse moyenne de la bouée 0,80 nœuds

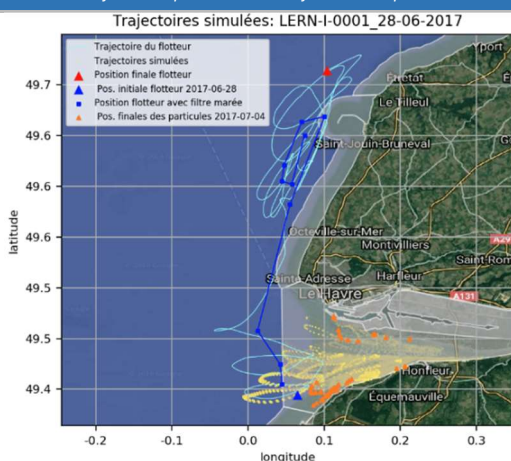
Distance filtrée de la marée / jour 3,22 milles nautiques

Distance parcourue après 48 h de dérive 12,63 milles nautiques

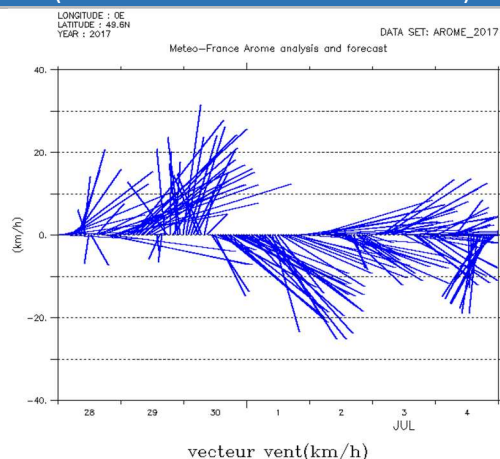
Etalement du nuage de points Fort

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

*Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées*



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



### Commentaires HT03

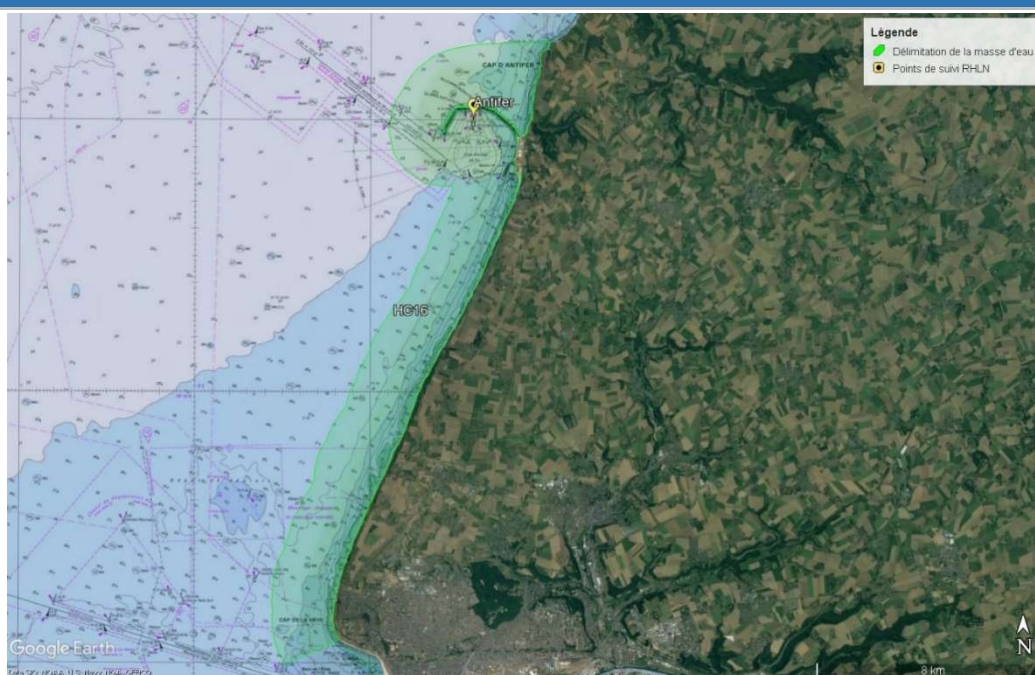
La bouée (0006) a été lâchée dans l'axe de l'estuaire de la Seine, au niveau du Havre, et proche de la limite Ouest de la masse d'eau HT03, dans des conditions de vent modéré de secteur Sud-Ouest. Elle est restée environ 12 h dans la masse d'eau, puis constamment poussée vers le Nord-Est par les vents de Sud-Ouest, elle a fini par s'échouer sur la digue Nord du port.

Le déplacement du nuage de particules simulées dans les mêmes conditions ne semble pas impacté par ce vent de Sud-Ouest, car il décrit un cercle au niveau du point initial. Cela pourrait s'expliquer par une mauvaise prise en compte du panache de la Seine extrêmement fluctuant géographiquement, et qui contribue en grande partie à rendre ce site de l'embouchure de Seine très complexe d'un point de vue hydrologique.

La deuxième bouée (0001) déployée le même jour en limite Sud de cette masse d'eau a été poussée par des vents de Sud-Ouest, et entraînée par le panache après avoir été déviée au niveau du port du Havre jusqu'au cap de la Hève. Elle s'est très rapidement retrouvée au niveau d'Etretat en deux cycles de marée. L'effet de la marée n'a donc pas été déterminant dans le cas de cette trajectoire réelle jusqu'au niveau d'Antifer.

Le nuage de points simulé dans les mêmes conditions reste coincé dans l'embouchure de la Seine entre Deauville et Honfleur. Là non plus le modèle ne reproduit pas correctement la trajectoire de la bouée, en raison de la mauvaise intégration du panache de la Seine, mais aussi de la non-prise en compte des vagues ainsi qu'une différence probable entre les vents simulés (moyens) et réels (variables avec rafales).

### HC16 – Le Havre - Antifer



#### Dimension de la masse d'eau

Surface 56,9 km<sup>2</sup>

Périmètre 60,2 km

#### Nom & coordonnées du point de suivi RHLN

Antifer ponton pétrolier 49° 39,971'N / 0° 7,914'E

#### Identifiants bouées & dates des lâchers

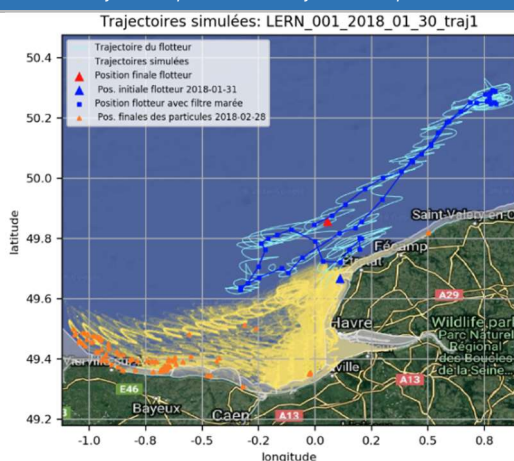
LERN-I-0001 31/01/2018

## LERN-I-0001

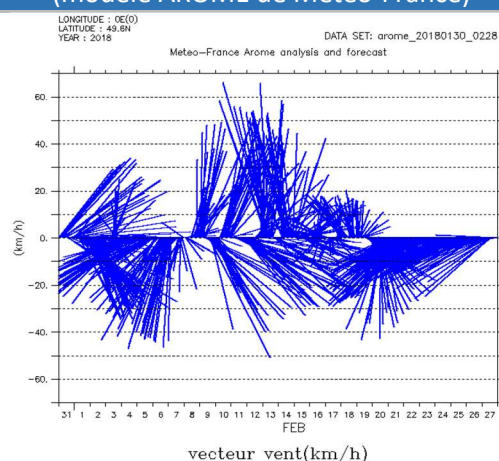
Dates	31/01/2018 - 28/02/2018 (T = 28 jours)
Position de mise à l'eau	49° 36,1667'N / 0° 06,1103'E
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	N
Temps passé dans la masse d'eau	0,5 h
Vitesse moyenne de la bouée	1,20 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,41 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	14,01 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Fort

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



## Commentaires HC16

En raison du positionnement très spécifique du point RHLN dans l'enceinte du port pétrolier d'Antifer, il est apparu plus pertinent de déployer la bouée (0001) à l'extérieur de ce périmètre portuaire. La trajectoire de la bouée suit assez fidèlement les phases de vent successives et de forte intensité, sans être contrainte par les effets de la côte. De toutes les bouées lâchées dans le cadre de cette étude, elle a parcouru la plus longue distance (14,01 milles nautiques) durant ses 48 premières heures de dérive. Après avoir parcouru les 40 premiers kilomètres, cette bouée se trouve à plus de 15 milles nautiques de sa position initiale, témoignant ainsi de l'hydrodynamisme fort de ce secteur. Le temps de résidence dans la masse d'eau est donc logiquement très faible (30 minutes).

Il apparaît que le modèle ne reproduit pas la trajectoire réelle de la bouée, notamment sur la première période du lâcher. En effet, le nuage de points des particules simulées ne passe pas au Nord d'Antifer, et reste bloqué sous une latitude de 49,7°N. Une mauvaise prise en compte des conditions initiales par le modèle semble être à l'origine de cette forte divergence avec la trajectoire réelle. Toutefois, le transport vers le Sud-Ouest en fin de simulation est bien reproduit.



#### 4.1.10 Secteur : Pays de Caux (HC17, HC18)

HC17 – Pays de Caux Sud	
<b>Dimension de la masse d'eau</b>	
Surface	132 km <sup>2</sup>
Périmètre	134 km
<b>Nom &amp; coordonnées du point de suivi RHLN</b>	
Fécamp 1 mille	49° 46,379'N / 0° 20,548'E
St Aubin 1 mille	49° 54,501'N / 0° 52,597'E
<b>Identifiants bouées &amp; dates des lâchers</b>	
LERN-I-0006	27/09/2016

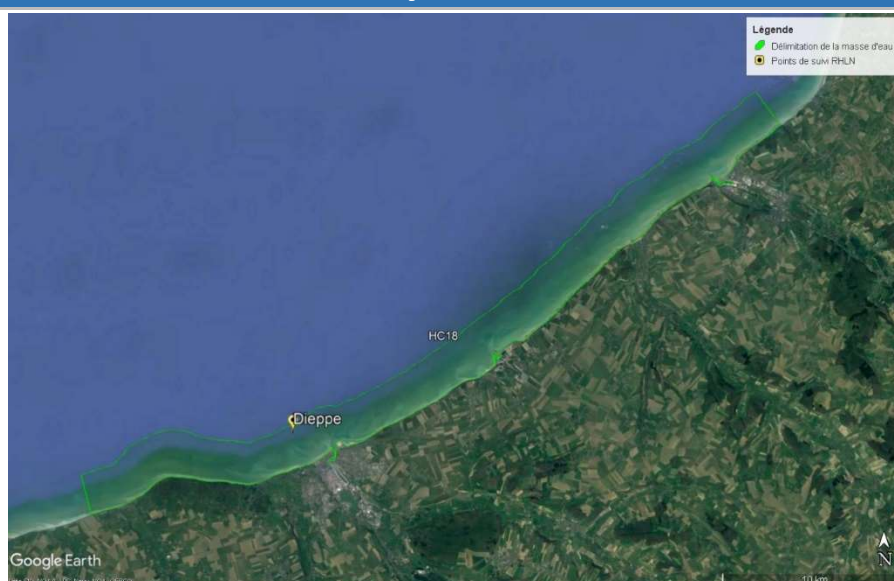
LERN-I-0006	
Dates	27/09/2016 – 07/10/2016 (T = 10 jours)
Position de mise à l'eau	49° 54,5213'N / 0° 52,1374'E
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	ONO
Temps passé dans la masse d'eau	35,6 h
Vitesse moyenne de la bouée	1,19 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,37 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	2,58 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Fort
<b>Trajectoire réelle de la bouée &amp; simulée</b>	<b>Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)</b>
<i>Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées</i> Trajectoires simulées: LERN-I-0006_27-09-16	

### Commentaires HC17

Le lâcher de la bouée (0006) a été effectué au point « St-Aubin 1 mille » situé près de la limite Est de la masse d'eau HC17. Entraînée vers le Nord par le courant résiduel et les vents de Sud-Ouest, elle s'est retrouvée dans la masse d'eau adjacente HC18. Cette progression a été vite contrariée par des vents de Nord-Est, et la bouée est restée tout le temps du suivi au large du point initial, décrivant ses oscillations parallèles à la côte pendant le flot et le jusant.

Le modèle reproduit correctement toute la première partie de la trajectoire, mais rapidement le nuage de points simulés s'est majoritairement étiré vers le Nord-Est jusqu'au Tréport alors qu'une petite partie, probablement poussée par les vents forts de Nord-Est, est revenue vers le Sud-Ouest au niveau du point de récupération de la bouée.

### HC18 – Pays de Caux Nord



#### Dimension de la masse d'eau

Surface 99,8 km<sup>2</sup>

Périmètre 101 km

#### Nom & coordonnées du point de suivi RHLN

Dieppe 1 mille 49° 56,450'N / 1° 3,250'E

#### Identifiants bouées & dates des lâchers

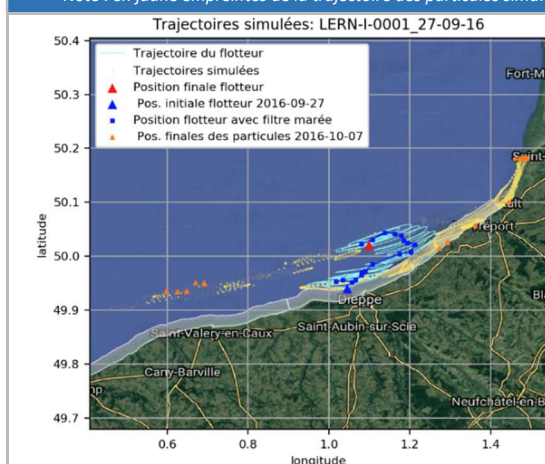
LERN-I-0001 27/09/2016

## LERN-I-0001

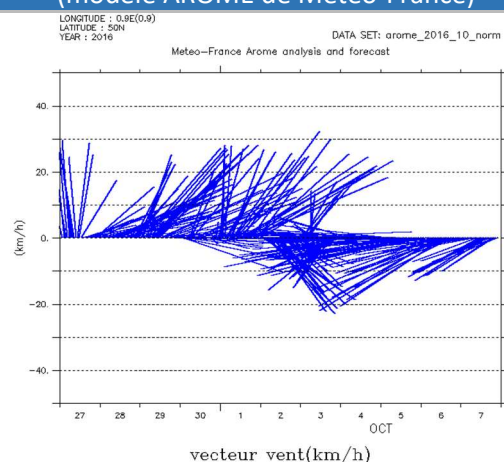
Dates	27/09/2016 – 07/10/2016 (T = 10 jours)
Position de mise à l'eau	49° 56,4268'N / 1° 02,8264'E
<b>Indicateurs de la trajectoire de la bouée</b>	
Direction moyenne	NNE
Temps passé dans la masse d'eau	10,5 h
Vitesse moyenne de la bouée	0,89 nœuds
Distance filtrée de la marée / jour	0,51 milles nautiques
Distance parcourue après 48 h de dérive	3,66 milles nautiques
Etalement du nuage de points	Fort

### Trajectoire réelle de la bouée & simulée

Note : en jaune empreintes de la trajectoire des particules simulées



### Conditions de vent local (modèle AROME de Météo-France)



### Commentaires HC18

La bouée (0001) lâchée sur le point « Dieppe 1 mille » a subi dans un premier temps des vents de secteur Sud / Sud-Ouest l'entraînant vers le large (Nord). Dans un second temps, des vents de secteur Est / Nord-Est ont contrarié sa remontée vers le Nord-Est, c'est-à-dire le long de la côte. Les oscillations régulières Sud-Ouest et Nord-Ouest sont bien représentées et confirment le caractère alternatif des courants de marée parallèles à cette bande côtière.

Toutefois le modèle ne reproduit que partiellement cette trajectoire : en effet le nuage de particules se fractionne en deux parties, l'une minoritaire vers le large puis vers l'Est comme la bouée, l'autre majoritaire beaucoup plus près de la côte et remontant jusqu'en baie de Somme.

## 4.2 Synthèse des indicateurs par masse d'eau

Le **Tableau 2** synthétise l'ensemble des indicateurs définis pour caractériser les trajectoires des bouées pour chaque lâcher dans les masses d'eau étudiées.

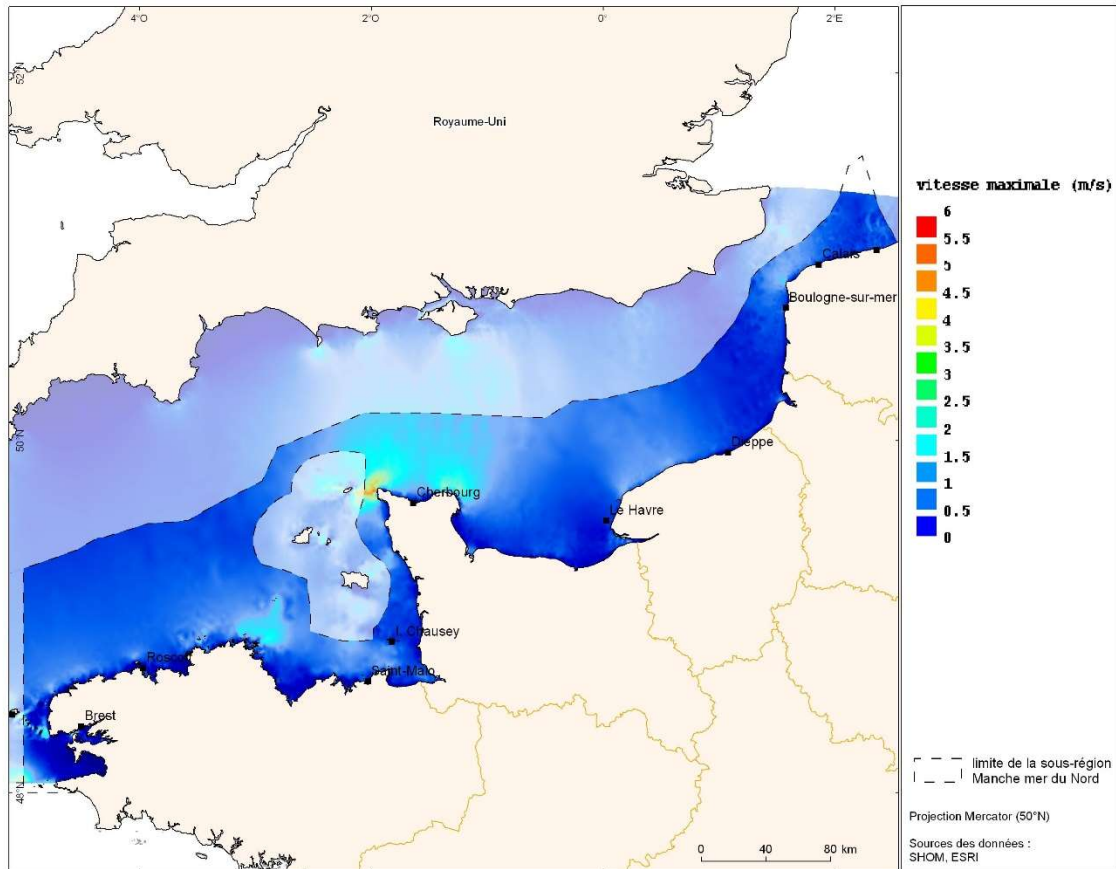
**Tableau 2** : Synthèse des indicateurs caractéristiques des lâchers de bouées par masse d'eau. SO (< 48h) : Sans objet car la bouée a dérivé moins de 48h.

Masse d'eau	Identifiant bouée	Date mise à l'eau	Durée du lâcher (jj/hh/mm)	Distance au point de mise à l'eau après 48 heures de dérive (mn)	Vitesse de déplacement (nds)	Distance filtrée de la marée / jour (mn)	Temps passé dans la masse d'eau initiale (h)
HC02	LERN-I-0006	02/10/2013	5:18:40	5,95	0,40	0,54	67
	LERN-I-0001	18/08/2017	2:3:04	3,89	0,31	1,62	51,2
HC03	LERN-I-0003	18/08/2017	2:6:52	0,65	0,46	0,54	54
	LERN-MS-0009	31/08/2017	1:14:50	SO (<48h)	0,31	1,62	38
	LERN-I-0005	20/08/2017	3:18:20	2,95	0,40	1,62	17,7
	LERN-MS-0008	31/08/2017	2:3:30	5,91	0,35	2,16	51,5
	LERN-I-0001	02/09/2017	3:18:20	3,22	0,38	0,54	82,3
	LERN-I-0006	06/10/2013	3:15:00	4,69	0,83	1,64	34
	LERN-I-0006	07/10/2013	1:3:30	SO (<48h)	1,05	4,24	15
	LERN-I-0003	01/09/2017	2:19:00	2,53	0,34	0,46	66
HC07	LERN-I-0001	24/04/2017	3:23:30	1,9	1,53	1,75	10,2
HC08	LERN-I-0002	24/04/2017	3:21:40	14,01	1,75	3,90	7,8
	LERN-I-0006	27/04/2017	6:20:20	11,41	2,04	1,77	2,9
HC10	LERN-MS-0009	25/06/2018	13:13:20	3,68	1,44	0,64	51
HT06	LERN-MS-0008	29/05/2018	5:18:10	8,52	1,03	2,50	4
	LERN-MS-0009	29/05/2018	5:17:50	5,42	0,81	1,55	11
HC11	LERN-MS-0009	11/06/2018	4:22:50	1,8	0,76	2,40	23,2
	LERN-I-0001	06/02/2017	5:4:00	8,77	0,96	2,09	0,2
	LERN-I-0006	06/02/2017	5:4:10	8,87	0,97	2,57	4,5
HC12	LERN-I-0002	06/02/2017	5:4:40	8,96	0,96	2,00	7,8
HC13	LERN-MS-0009	06/06/2018	2:8:30	12,72	0,74	6,65	2,5
HC15	LERN-I-0003	06/06/2018	5:17:30	2,12	0,56	3,72	1,3
	LERN-MS-0009	04/06/2018	4:1:40	5,02	0,68	2,84	15,5
HT03	LERN-I-0001	04/07/2017	5:22:40	12,63	0,80	3,22	15,8
	LERN-I-0006	29/06/2017	0:14:40	SO (<48h)	0,55	4,42	12,1
HC16	LERN-I-0001	28/02/2018	28:10:20	14,01	1,20	0,41	0,5
HC17	LERN-I-0006	07/10/2016	10:3:10	2,58	1,19	0,37	35,6
HC18	LERN-I-0001	07/10/2016	10:1:52	3,66	0,89	0,51	10,5

Les indicateurs montrent que les distances parcourues par les bouées en 48 heures étaient plus importantes dans le secteur du Nord-Est Cotentin (HC08), de la côte du Bessin (HC11) et côte de Nacre (HC12-HC13) (**Tableau 2**).

Ils confirment aussi l'hydrodynamique importante notamment dans les masses d'eau du Nord-Est Cotentin (HC07 et HC08) et en sortie de l'estuaire de la Seine et son « fleuve côtier » (HT03, HC16, HC17). Ceci rejoint les données du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), où la carte de la vitesse des courants dans la sous-région marine Manche – Mer du Nord montre que les secteurs où les courants sont les plus rapides en Normandie sont au raz Blanchard (HC04-HC05), autour de la pointe de Barfleur (HC07-HC08) et dans une moindre mesure au Sud du Pays de Caux (HC16-HC17), et au niveau du Cap de Carteret (HC04) (**Figure 22**).

Du fait de cette répartition des courants, les bouées ont passé le plus de temps dans les masses d'eau où les courants sont plus faibles, de l'Ouest Cotentin (HC02, HC03), et en sortie de la baie des Veys (HC10) (**Tableau 2**).



*Figure 22 : Carte des vitesses maximales des courants (en m/s) dans les eaux marines de la sous-région marine Manche – Mer du Nord.*

### 4.3 Considérations sur la réponse du modèle par rapport aux données *in situ*

Les bouées ont été lâchées dans la mesure du possible à proximité des points de suivi RHLN des masses d'eau DCE. Les durées des lâchers étaient variables, et certaines bouées se sont éloignées considérablement de leur position initiale. Aussi, **la durée optimale pour des simulations avec le modèle calibré et leur comparaison avec la trajectoire d'une bouée est d'environ une semaine.** Au-delà, l'incertitude est très forte, principalement en raison de la rugosité due aux vagues qui modifient l'entraînement de la bouée. Lors de la calibration du modèle, un nombre limité de 6 scénarios a été utilisé pour trouver une formulation appropriée afin d'ajouter cet effet du vent qui puisse s'appliquer à la majorité des cas, mais qui ne peut pas être modifiée pour chaque simulation. Au-delà d'une semaine, les trajectoires des bouées peuvent encore servir à valider le modèle.

**Les comparaisons du modèle avec les trajectoires réelles sont néanmoins en général satisfaisantes.** Si la durée de la simulation est courte, le même motif de la trajectoire a été retrouvé. Cela a été le cas sur la partie Ouest du Cotentin, à l'**exception de la baie du Mont St Michel**, très particulière en raison de son fort marnage et de son estran très étendu. La partie Nord Cotentin a des courants de marée très forts, qui sont bien représentés. Il faut cependant relativiser la fiabilité du modèle dans la partie Ouest de la baie de Seine, où les vents de Nord-Est provoquent des contres courants remontant vers le Nord-Ouest avant de repartir vers le large (type courant de retour dû au dessin de la côte). Le vent a tendance à pousser les particules trop près des côtes. **Les trajectoires des points situés dans les estuaires sont également assez mal représentées**, en raison des faibles profondeurs ou de la surestimation de l'action modélisée du vent. Enfin au Nord de la Seine, les courants sont parallèles à la côte et la dérive causée par le vent est plus fidèlement modélisée. La dispersion du nuage traduit quand même un gradient important de la côte depuis le large.

**Le modèle permet en outre de caractériser la dispersion**, au moyen du calcul des distances totale et relative, qui donne le ratio de la distance parcourue intégralement sous l'action de la marée sur la distance entre les points de départ et d'arrivée. Par ailleurs, l'étalement du nuage des traceurs particuliers donne une information importante sur la disparité des courants, sachant que les particules sont initialement relâchées sur une surface équivalente à une maille. La dispersion horizontale dans le modèle est avant tout générée par les gradients de courants d'une maille à l'autre.

**Une meilleure résolution du modèle pourrait permettre d'améliorer la reproduction des courants dans la partie Sud de la baie de Seine**, où de petites structures semblent se dessiner près des côtes.

**L'inconvénient principal reste la prise en compte du forçage « vent »**, qui est une donnée horaire, et dont l'action liée à la houle peut générer un entraînement supplémentaire en surface. Par contre, quand la profondeur est faible, l'entraînement par le vent semble trop fort, et les particules butent souvent sur la côte si le vent les y pousse.

## 5 Etude des temps de renouvellement dans les masses d'eau à l'aide de la modélisation

### 5.1 Secteur Ouest Cotentin

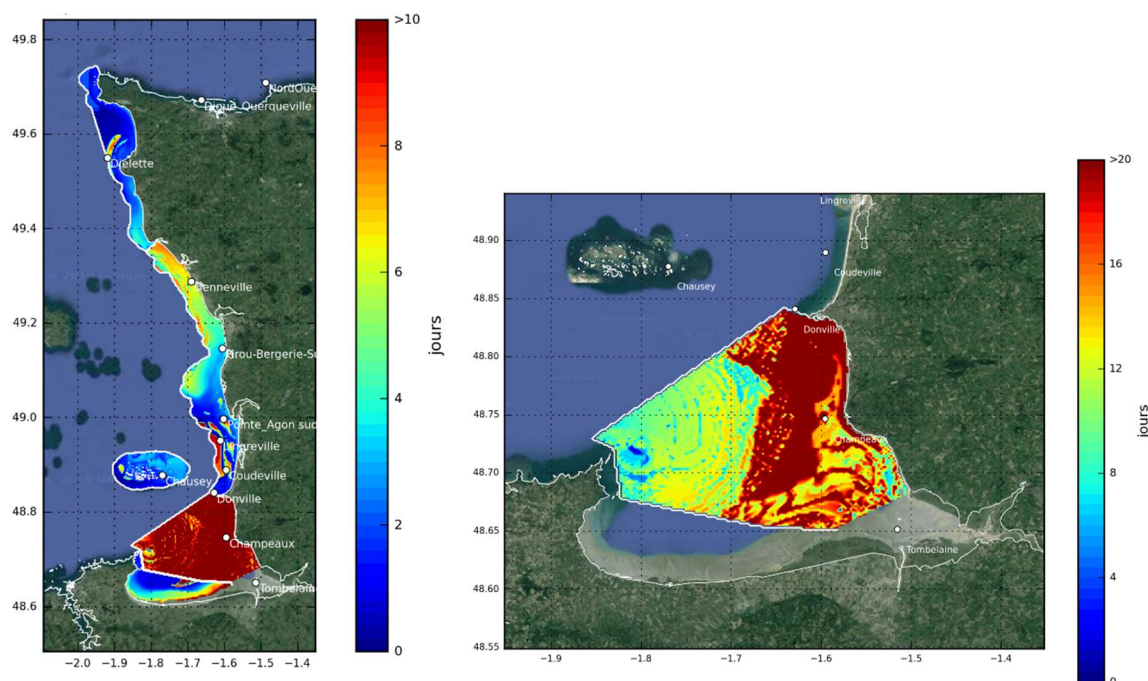
#### 5.1.1 Evolution spatiale des temps de renouvellement

Les masses d'eau situées à l'Ouest de la péninsule du Cotentin sont de deux types :

- ✓ des masses d'eau côtières définies généralement par une bande peu large ;
- ✓ des masses d'eau plus étalées spatialement, dans la baie du Mont Saint-Michel, et plus particulièrement celle du centre de la baie (HC02).

La masse d'eau Ouest Cotentin (HC03) est la plus étirée. Elle est aussi moins vite dispersée au Nord qu'au Sud, en raison du fait que les eaux dérivent naturellement vers le Nord (**Figure 23**). Par ailleurs, la zone située sous la pointe de Barneville « retient » ces eaux pendant quelques jours. Devant le point « Pointe Agon Sud », des empreintes de zones visiblement moins vite dispersées sont observées, en raison de la présence de tourbillons permanents et d'une dérive moins forte.

Dans la masse d'eau HC04, le temps de renouvellement est réduit à moins de 2 jours sur sa quasi-totalité, en raison de courants très forts qui s'accroissent en remontant vers le Nord (**Figure 23**). La dispersion est cependant moins rapide au Sud de cette masse d'eau, avec un temps de renouvellement de l'ordre de 4 jours, ce qui ne confirme pas l'idée d'une dérive continue des eaux longeant la côte du Cotentin jusqu'au Nord.



**Figure 23 :** Cartographie des temps de renouvellement dans les masses d'eau de l'Ouest du Cotentin, avec une échelle à 10 jours (à gauche), et à 20 jours pour HC02 (à droite).

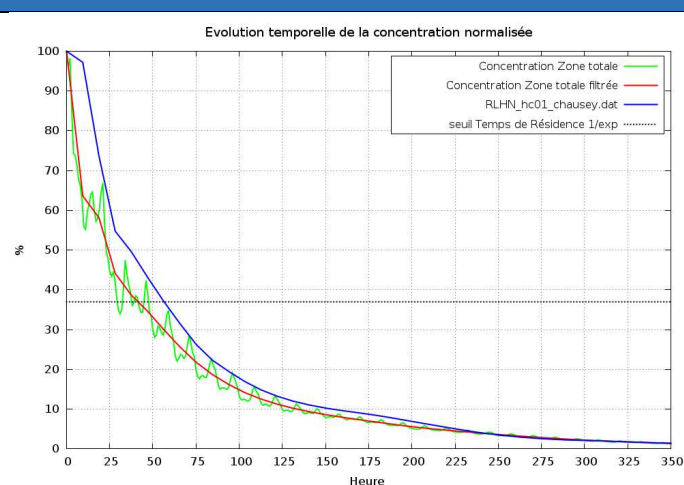
La masse d'eau Centre Baie (HC02) est particulière, car le temps de renouvellement calculé via l'hypothèse d'une décroissance « exponentielle » est largement supérieur à celui des autres masses d'eau (**Figure 23**). En particulier, en étirant l'échelle de temps commune [0-10 jours] jusqu'à [0-20 jours], des temps de l'ordre de 20 jours dans la partie orientale de la masse d'eau peuvent

être observés. A l'Ouest, le temps de renouvellement est plutôt de 8 à 12 jours. Il existe dans cette masse d'eau de nombreuses recirculations qui sont à l'origine de ces valeurs fortes. Cela s'explique aussi par le fait qu'une quantité importante de traceurs est relâchée dans une masse d'eau assez profonde pour le secteur, et ces traceurs sont entraînés vers le fond de baie à l'Ouest à la marée descendante. Il n'y a donc pas d'effet de dilution, et son évacuation par le Nord est retardée.

La masse d'eau HT05 est située sur une zone d'estran qui ne se couvre qu'à marée haute, à des coefficients importants. Pour cette simulation, réalisée par un coefficient de 95, il est difficile d'établir des calculs de temps de résidence sur l'ensemble de la zone, car la mer n'est pas montée assez haut. La simulation démarre donc avec une couverture spatiale de la zone trop faible pour représenter la zone (**Figure 23**).

### 5.1.2 Evolution temporelle des particules dissoutes

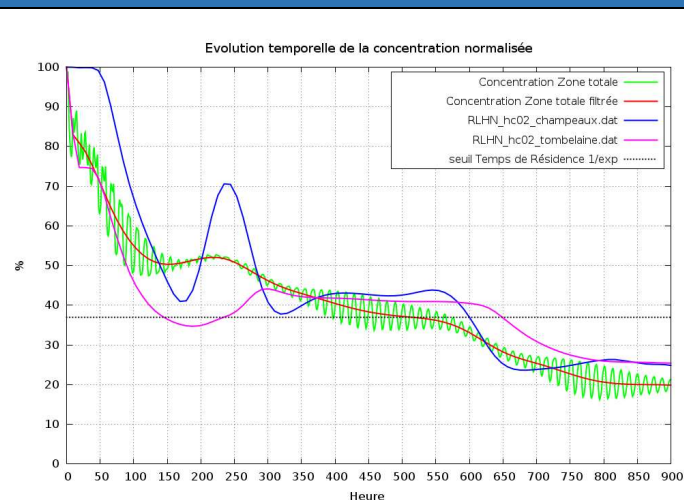
#### HC01 – ARCHIPEL CHAUSEY



**Figure 24 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC01 et au point « Chausey ».

L'évolution de la concentration des traceurs dissous au point de surveillance « Chausey » est similaire à l'évolution globale dans la masse d'eau HC01 (**Figure 24**). Le temps de renouvellement est toutefois supérieur de quelques heures (58 h) à celui à l'échelle de la masse d'eau (40 h). Ce résultat est cohérent dans la mesure où le point se situe au centre de la masse d'eau qui n'a pas de frontière fermée.

#### HC02 – BAIE DU MONT SAINT-MICHEL : CENTRE BAIE

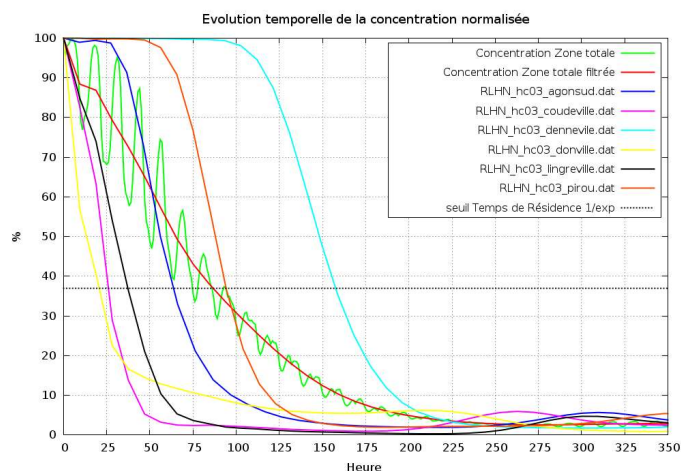


**Figure 25 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC02, et aux points « Champeaux » et « Tombelaine » (HT05).

La zone de la baie du Mont Saint-Michel est complexe, comme le montre les concentrations des traceurs dissous dans la masse d'eau, qui ne diminuent pas selon une loi exponentielle (**Figure 25**). A l'échelle de la masse d'eau, le temps de renouvellement se situe autour de 520 h. Les concentrations diminuent moins rapidement aux points « Tombelaine » (650h, car le premier passage sous 1/e est temporaire) et « Champeaux » (600h), car ils sont situés près des côtes où le courant résiduel est moins marqué, avec la présence de tourbillons. Ces points semblent bien rendre compte de la concentration globale dans la baie.



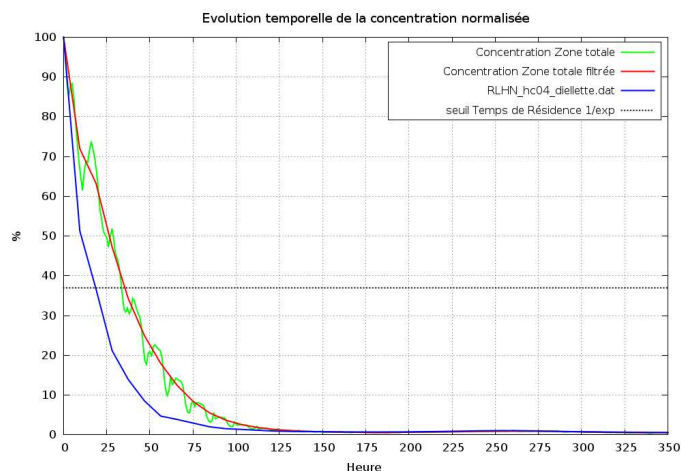
## HC03 – OUEST COTENTIN



**Figure 26 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC03, et aux points « Donville », « Coudeville 1 mille », « Ouest Lingreville », « Pointe Agon sud », « Pirou Bergerie sud », et « Denneville ».

La zone Ouest Cotentin est la plus étirée des masses d'eau du littoral normand. Etant donnée l'hypothèse d'un lâcher à marée haute et la disposition des points, ceux situés dans la moitié Sud (« Donville », « Coudeville 1 mille », « Ouest Lingreville », « Pointe Agon Sud ») décroissent plus vite que la masse d'eau totale, dont le temps de renouvellement est de 88 h (**Figure 26**). A l'inverse, les points les plus au Nord (« Pirou Bergerie sud », « Denneville ») voient la quasi-totalité des eaux de la masse d'eau se décaler vers eux, et cela retarde le renouvellement, jusqu'à 160 h pour le point « Denneville ». Le point de Pirou Bergerie sud semble reproduire le mieux la concentration globale dans la masse d'eau, avec un temps de renouvellement de 90 h.

## HC04 – CAP DE CARTERET - CAP DE LA HAGUE



**Figure 27 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC04, et au point « FLAM-Dielette ».

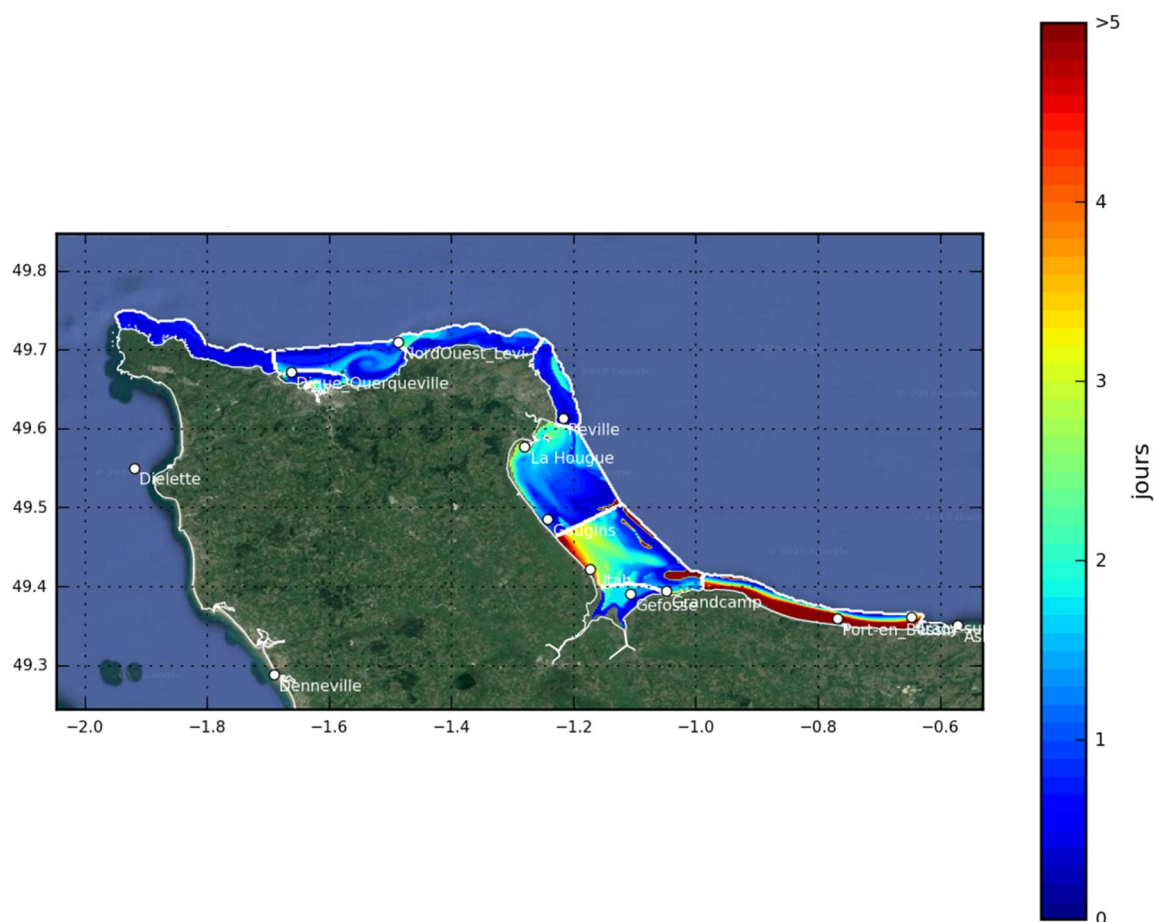
Les concentrations en traceurs dissous décroissent rapidement dans la masse d'eau du Cap de Carteret (HC04), car elle est située à proximité du raz Blanchard, une zone de courant intense (**Figure 27**). Le temps de renouvellement estimé est de 36 h dans la masse d'eau, tandis que celui au point de suivi décroît deux fois plus vite. Même s'il est situé à peu près au milieu de la masse d'eau selon l'axe Nord-Sud, il est très excentré à l'Ouest ce qui peut expliquer sa dilution plus rapide (temps de renouvellement de 16 h).

## 5.2 Secteur Nord et Est Cotentin

### 5.2.1 Evolution spatiale des temps de renouvellement

L'échelle des figures est ici ramenée de 0 à 5 jours afin de voir les faibles gradients notamment dans les masses d'eau de Saint Vaast (HC09) et de la baie des Veys (HT06 et HC10) (**Figure 28**).

La partie Nord Cotentin qui va de la Pointe de Jobourg jusqu'à Réville (masses d'eau HC05, HC60 et HC61, HC07 et HC08) est plus « homogène », avec en moyenne des temps de renouvellement inférieures à 48 h (**Figure 28**).



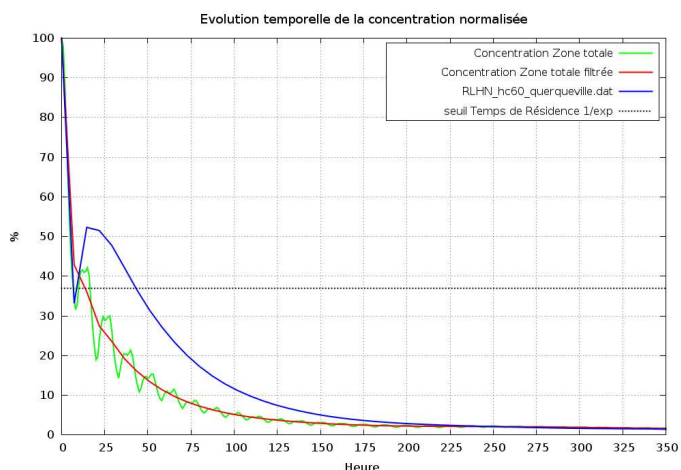
**Figure 28** : Cartographie des temps de renouvellement dans les masses d'eau du Nord et Est du Cotentin, avec une échelle à 5 jours.

Trois masses d'eau montrent des disparités spatiales plus marquées (**Figure 28**) :

- la partie ouest de la baie des Veys (HC10) a un temps de renouvellement plus proche de 3 à 5 jours. Les traceurs remontent vers le Nord-Ouest et leur évacuation est ralentie ;
- une partie des traceurs de la masse d'eau de Saint Vaast (HC09) reste confinée à la côte et ne disperse qu'en 2-3 jours ;
- la frange très côtière de la masse d'eau de la côte ouest du Bessin (HC11) a une surprenante valeur proche de 10 jours (non visible sur cette échelle). La circulation est parallèle à la côte et confine les traceurs dans une bande étroite et peu dispersée en l'absence de vent. La bathymétrie à cet endroit de la côte est également plus profonde (zone d'estran moins étendue et donc moins d'oscillation Nord-Sud favorisant le mélange).

## 5.2.2 Evolution temporelle des particules dissoutes

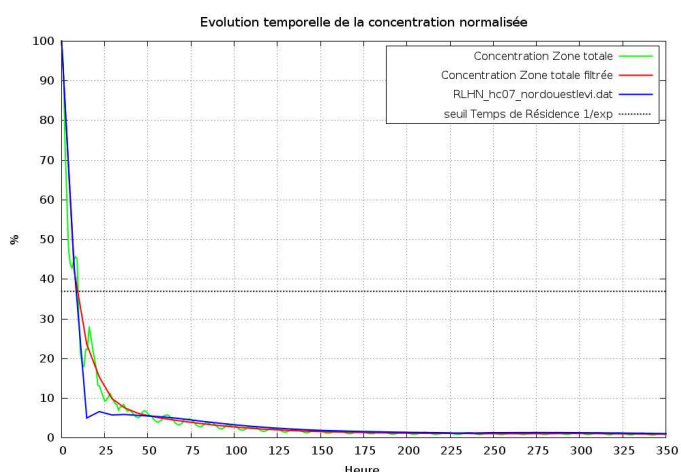
### HC60/HC61 – RADE DE CHERBOURG



**Figure 29 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC61 et au point « Digue de Querqueville » (HC60).

La masse d'eau de la Rade de Cherbourg a un temps de renouvellement très court d'à peine 15 h (**Figure 29**). Le point « Digue de Querqueville » est situé au nord de la grande digue, légèrement à l'Ouest de la masse d'eau. Sa décroissance est moins lisse, et son temps de renouvellement décalé de quelques heures (40 h). Il y a probablement une recirculation locale ramenant le panache vers l'Ouest dans cette partie de la masse d'eau. Le traceur dissous est relâché très légèrement avant la marée haute, ce qui provoque cette décroissance rapide au point de suivi. A la marée descendante, le traceur revient vers le point, mais la masse d'eau se vide alors par l'Ouest. Etant donné sa localisation (ce serait la même chose dans l'autre passe), la concentration du point de suivi est plus lente à se dissiper. La digue ouverte en deux endroits permet une ventilation rapide de la masse d'eau.

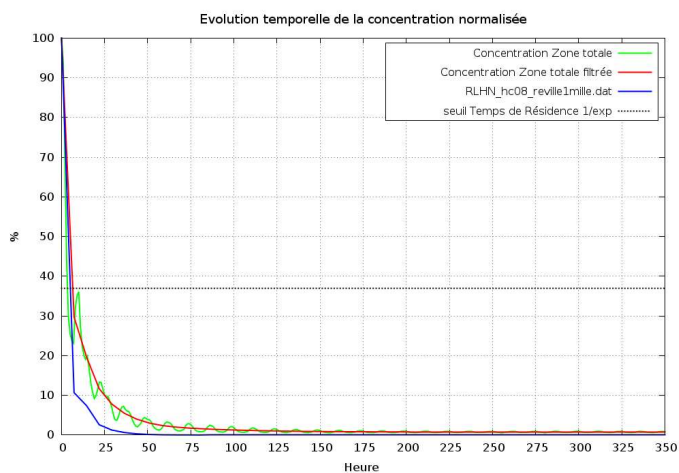
### HC07 – CAP LEVY - GATTEVILLE



**Figure 30 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC07, et au point « Nord Ouest Levi ».

La décroissance de la concentration du traceur est plus rapide dans HC07, que ce soit au niveau du point de surveillance ou de la masse d'eau entière avec un temps record de moins de 12h (**Figure 30**). L'initialisation ayant lieu autour de la marée haute (à quelques minutes près) et le point étant situé en bordure Ouest de la masse d'eau, le traceur est rapidement dilué, le panache se décollant rapidement de la côte. Le positionnement du point de suivi permet bien de rendre compte de la concentration à l'échelle de la masse d'eau.

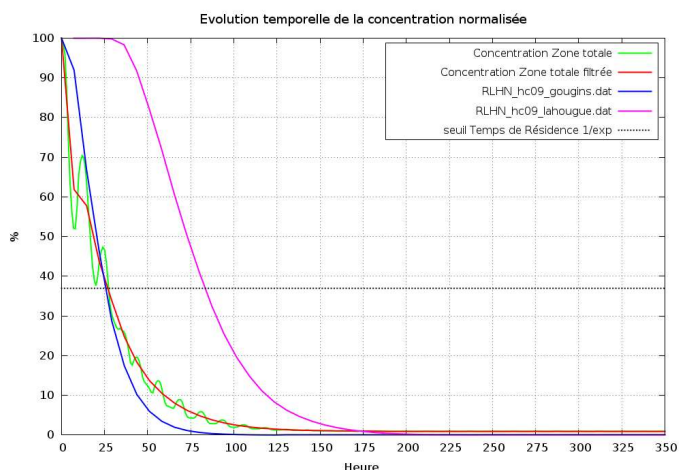
## HC08 – BARFLEUR



**Figure 31 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC08, et au point « Réville 1 mille ».

La masse d'eau de Barfleur est la plus rapidement diluée, avec un temps de renouvellement de moins de 12h (**Figure 31**). Bien que la simulation démarre à la pleine mer, cela veut quand même dire que le panache ne revient pas dans la masse d'eau après un cycle de marée. Le point de suivi, situé en sa bordure Sud décroît à la même vitesse. Son positionnement permet bien de rendre compte de la concentration à l'échelle de la masse d'eau.

## HC09 – ANSE DE ST VAAST LA HOUGUE



**Figure 32 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC09, et aux points « La Hougue » et « Gougins ».

La masse d'eau HC09 est moins rapidement dispersée que les masse d'eau du Nord Cotentin, son temps de renouvellement est estimé à 26 heures (**Figure 32**). Deux points y sont suivis : « Gougins » situé dans la partie Sud, plus ouverte, suit la même loi de décroissance que la masse d'eau, tandis que le point « La Hougue » abrité par la presqu'île a un temps de renouvellement au-delà de 80 h. Le point « Gougins » paraît donc bien de rendre compte de la concentration à l'échelle de la masse d'eau.

## HT06 – BAIE DES VEYS : FOND DE BAIE ESTUARIEEN ET CHENAUX D'ISIGNY ET DE CARENTAN

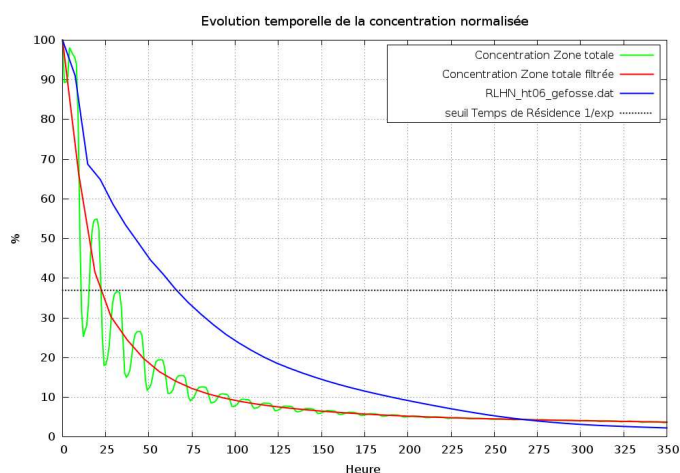


Figure 33 : Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HT06, et au point « Géfosse ».

Le fond de la baie est plus rapidement dilué, en raison de l'apport d'eau douce par la Douve et la Vire sur une zone côtière peu profonde. Le temps de renouvellement global est de 21h, tandis que le point de suivi est trois fois moins rapide pour atteindre la valeur de seuil de 36% après 65h (Figure 33). Le point « Géfosse » est situé dans le chenal et par conséquent toujours en eau, ce qui n'est pas le cas de la majeure partie de la masse d'eau contenant une large surface d'estran (et dont la concentration diminue plus vite). Ce point de suivi représente donc aussi bien que possible l'évolution à l'échelle de la masse d'eau, malgré une surestimation de + 150 %.

## HC10 – BAIE DES VEYS

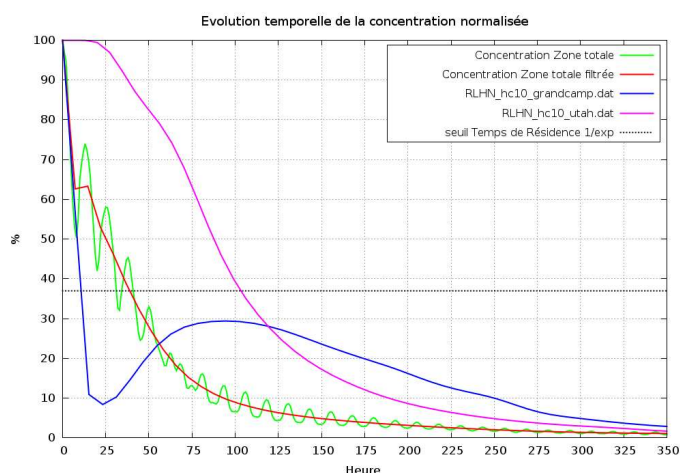
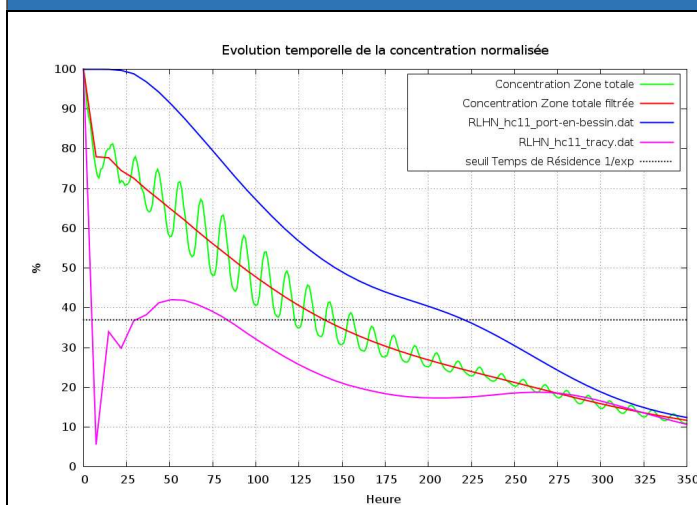


Figure 34 : Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC10, et aux points « Utah » et « Roches de Grandcamp ».

La masse d'eau HC10 a un temps de renouvellement estimé à 36 h (Figure 34). Les deux points de suivi se comportent de manière totalement différente. La concentration au point « Roches de Grandcamp » diminue très rapidement en raison de la première marée descendante entraînant la masse d'eau vers l'Ouest. Les apports d'eau douce peuvent empêcher le panache de revenir dans cette masse d'eau. Pour les mêmes raisons, la concentration au point « Utah » situé à l'Ouest a une décroissance plus lente, le panache revenant plutôt vers celui-ci. La courbe de décroissance de la concentration aux deux points ne permet pas de dire s'ils représentent correctement la masse d'eau pour un lâcher à la pleine mer.

## HC11 – COTE DU BESSIN



**Figure 35 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC11, et aux points « Port-en-Bessin 1 mille » et « Tracy-sur-Mer ».

La masse d'eau « Côte du Bessin » (HC11) a une dispersion beaucoup moins rapide que ces voisines de l'Ouest, avec un temps de renouvellement de 140 h (**Figure 35**). La concentration au point de suivi « Port-en-Bessin 1 mille » affiche un temps de 220 h tandis que le point « Tracy-sur-Mer » situé à la frontière Est, bien qu'initialement très dilué par la première marée, se rapproche ensuite de la concentration globale. Ces deux points semblent bien encadrer l'évolution globale de la concentration dans la masse d'eau avec la même pente de décroissance.

### 5.3 Secteur baie de Seine orientale

#### 5.3.1 Evolution spatiale des temps de renouvellement

Le secteur de la baie de Seine orientale présente les plus forts gradients en termes de temps de renouvellement. En effet, dans la masse d'eau au Nord de l'estuaire de Seine (HC16) ouverte sur le large, les eaux sont rapidement dispersées (1-2 jours maximum). Par contre, la masse d'eau de l'estuaire de Seine (HT03) n'est pas si rapidement expulsée si le débit de la Seine n'est pas suffisant ou si les vents sont nuls. Les temps de renouvellement varient donc de quelques heures à plus de 6 jours en remontant l'estuaire vers le pont de Normandie (**Figure 36**).

Dans les masses d'eau HC14, et HC15, les temps de renouvellement augmentent d'Ouest en Est, passant d'à peine 1 jour à 3-4 jours. Ceci est dû à l'effet de la marée qui entraîne les eaux vers la frontière Est des masses d'eau. Pour la côte de nacre (HC12 et HC13), le centre de ces masses d'eau montre le plus lent temps de renouvellement (**Figure 36**).

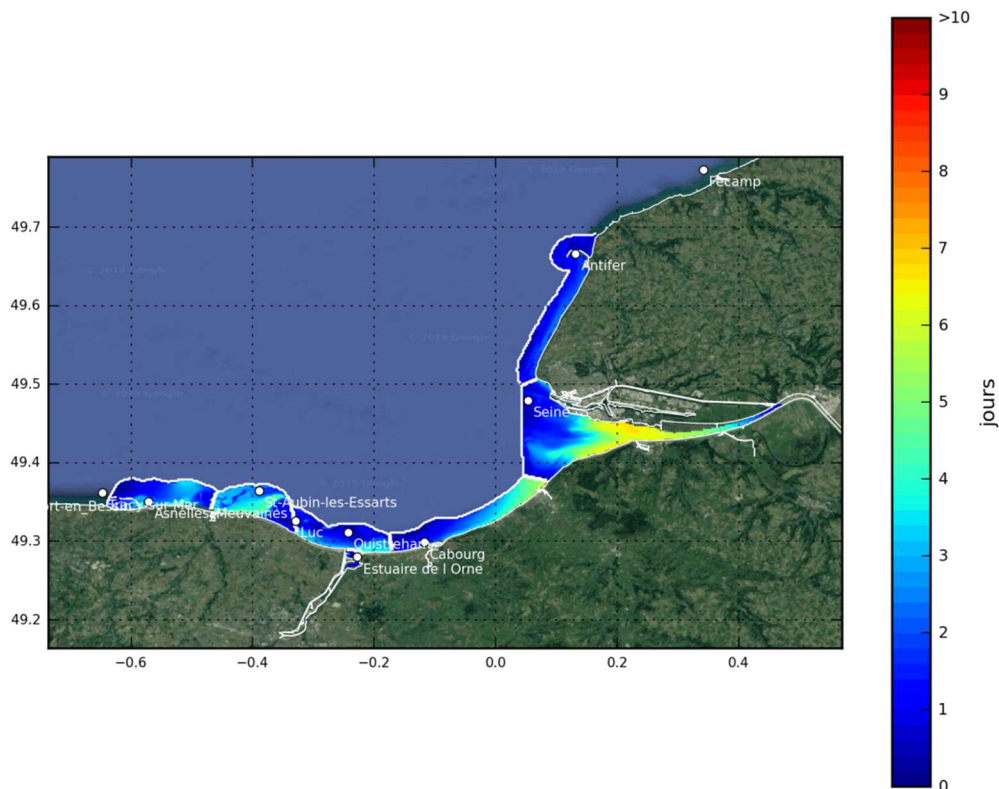


Figure 36 : Cartographie des temps de renouvellement dans les masses d'eau de la baie de Seine orientale, avec une échelle à 10 jours.

### 5.3.2 Evolution temporelle des particules dissoutes

#### HC12 – COTE DE NACRE OUEST

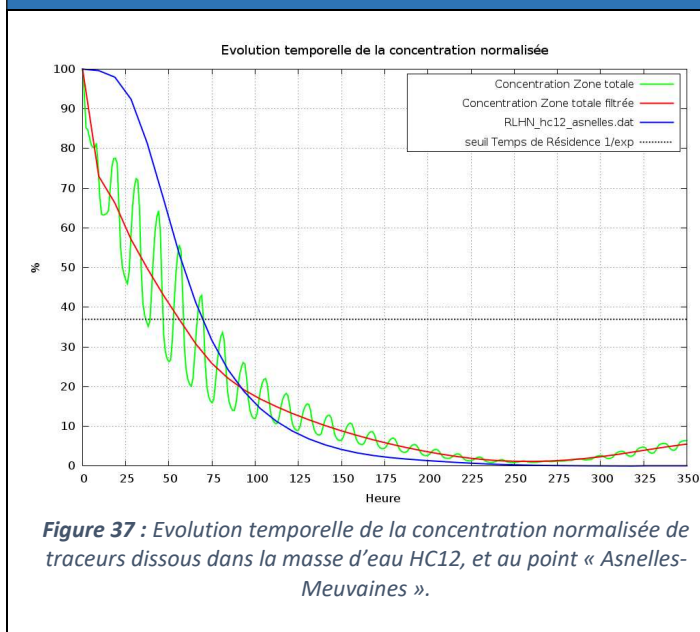
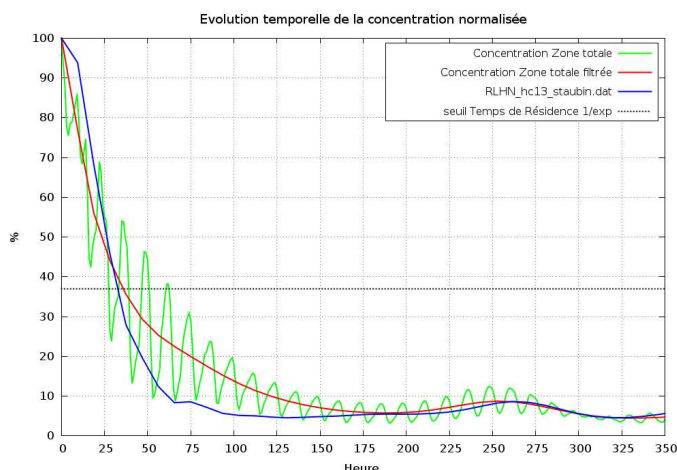


Figure 37 : Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC12, et au point « Asnelles-Meuvoines ».

La masse d'eau « Côte de Nacre Ouest » (HC12) a une concentration qui décroît de manière quasi linéaire, avec un temps de renouvellement est de 55 h (Figure 37). La concentration au point de suivi « Asnelles-Meuvoines » suit approximativement la même loi, avec un temps légèrement supérieur (68 h). Le positionnement de ce point de suivi situé en son centre, permet bien de rendre compte de la concentration à l'échelle de la masse d'eau.

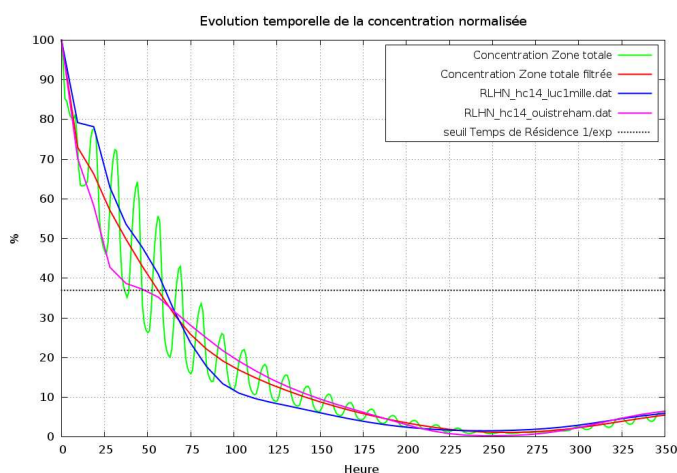
## HC13 – COTE DE NACRE EST



**Figure 38 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC13, et au point « St Aubin les Essarts ».

La masse d'eau à l'Est de la côte de Nacre (HC13) est légèrement plus rapide à se disperser avec un temps de renouvellement de 37 h (**Figure 38**). Le point de suivi « St Aubin les Essarts », bien que situé proche de la frontière Nord de la masse d'eau du fait de la présence du platier rocheux, semble bien la représenter, car la dérive résiduelle de marée a une composante Nord qui entraîne la masse d'eau. Son positionnement permet bien de rendre compte de la concentration à l'échelle de la masse d'eau.

## HC14 – BAIE DE CAEN

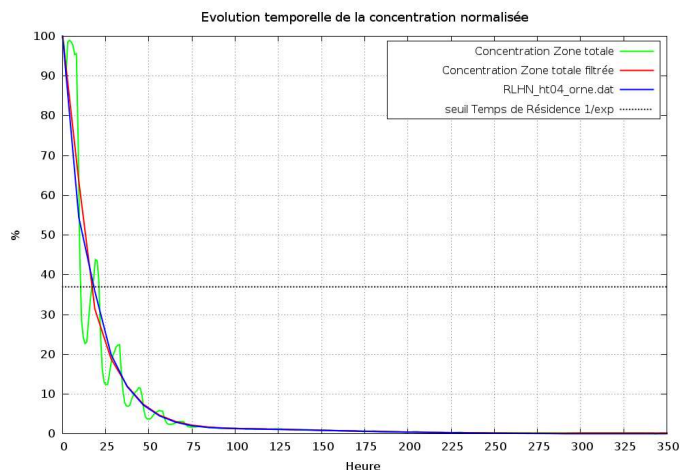


**Figure 39 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC14, et aux points « Ouistreham 1 mille » et « Luc 1 mille ».

La masse d'eau de la baie de Caen (HC14) se comporte de manière identique à ses voisines (HC13 et HC15) en raison de l'orientation de la côte, et le temps de renouvellement y est du même ordre (55 h) (**Figure 39**). Les concentrations aux points de suivis « Ouistreham 1 mille » et « Luc 1 mille » sont fidèles à l'évolution de la concentration globale de la masse d'eau.



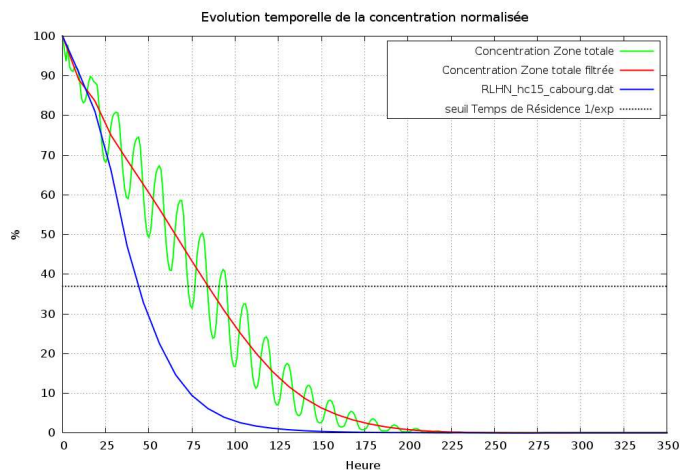
## HT04 – ESTUAIRE DE L'ORNE



**Figure 40 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HT04, et au point « Estuaire de l'Orne ».

La masse d'eau de l'estuaire de l'Orne (HT04) est directement soumise aux apports de la rivière dont l'effet est de réduire son temps de renouvellement à une valeur faible (19 h) (**Figure 40**). La concentration au point de suivi « Estuaire de l'Orne » situé dans l'axe du panache, suit parfaitement la décroissance globale de la concentration dans l'estuaire.

## HC15 – COTE FLEURIE



**Figure 41 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC15, et au point « Cabourg ».

La masse d'eau de la Côte Fleurie (HC15) située sous l'influence directe de l'estuaire de Seine a un temps de renouvellement légèrement supérieur aux masses d'eau plus occidentales (86 h) (**Figure 41**). Le point de suivi « Cabourg », situé au Sud-Ouest de la masse d'eau, le traceur dissous se disperse plus rapidement, sous le seuil des 50 heures.

## HT03 – ESTUAIRE DE SEINE AVAL

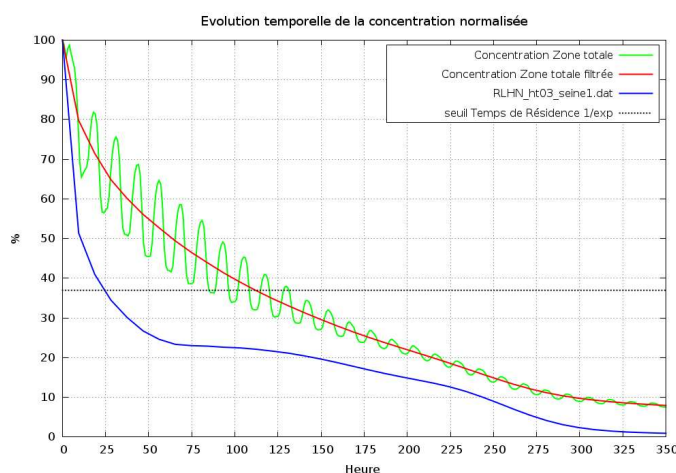


Figure 42 : Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HT03, et au point « Seine 1 ».

L'estuaire de Seine Aval (HT03), bien que situé dans une embouchure, a un temps de renouvellement relativement long (115 h) (Figure 42). Le point de suivi est situé au Nord près de la frontière Ouest de la masse d'eau, en bordure du panache lorsque celui-ci s'échappe en l'absence de forçages météorologiques. Il est donc logiquement dispersé bien plus rapidement que dans l'ensemble de la masse d'eau, à peine 25 h. Si la concentration descend rapidement sous le seuil, la décroissance suit ensuite la tendance de la masse d'eau. Le temps de renouvellement global assez long s'explique d'une part par l'étendue de la masse d'eau vers le large et vers l'intérieur des terres, et d'autre part car la marée peut avoir ici pour effet de maintenir le panache dans cette zone, s'opposant au débit (qui est ici un débit moyen).

## HC16 – LE HAVRE - ANTIFER

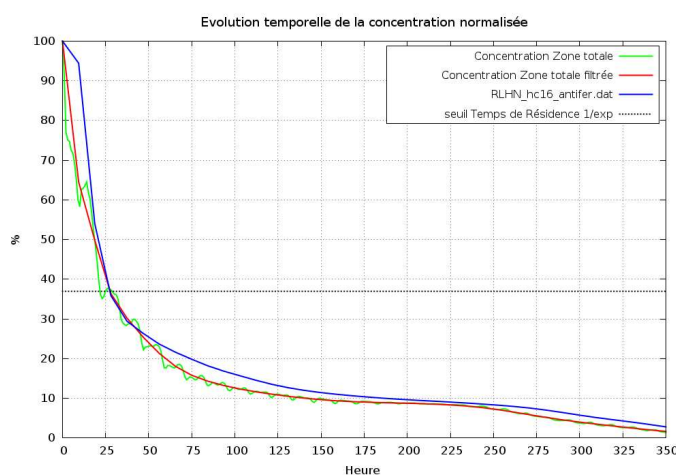


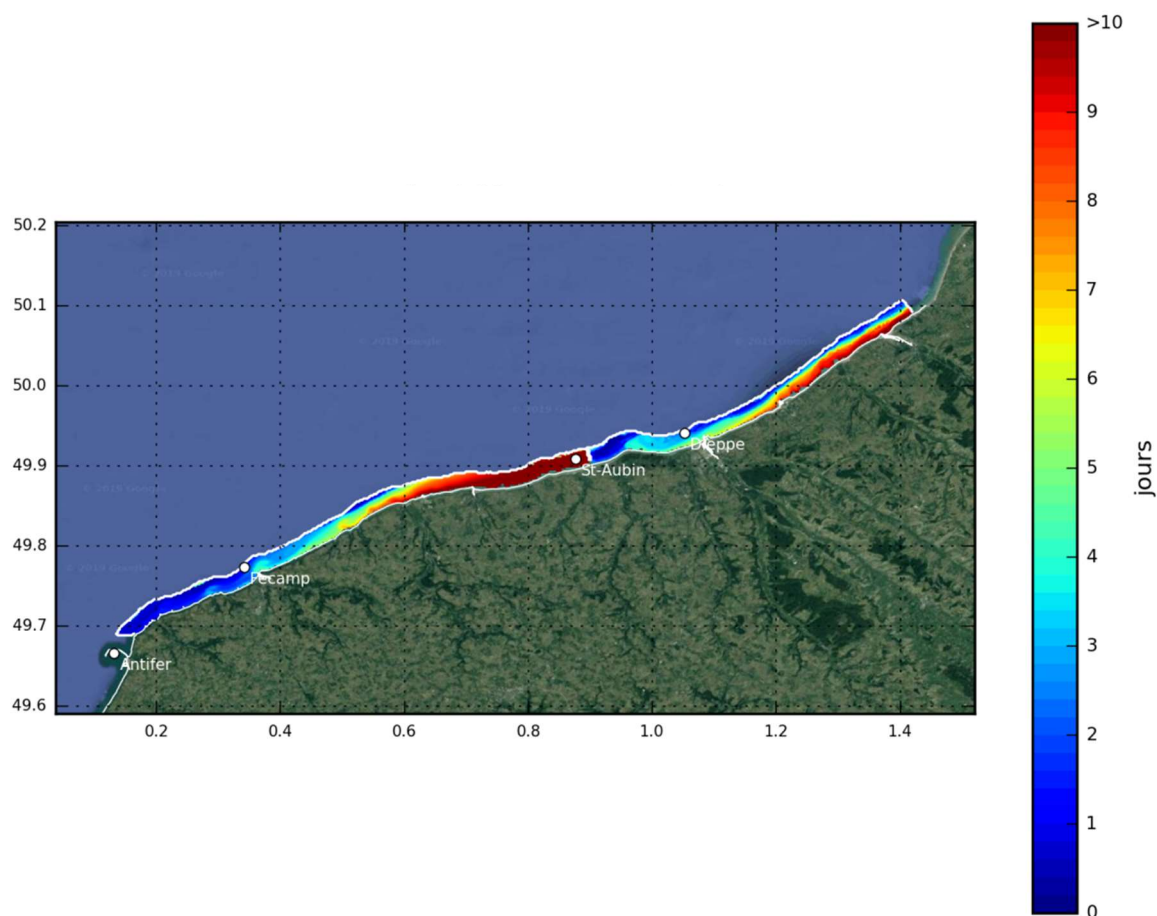
Figure 43 : Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC16, et au point « Antifer ponton pétrolier ».

La masse d'eau du Havre-Antifer se situe au Nord de l'estuaire de Seine. Naturellement le panache de la Seine remonte vers le Nord, entraînant les eaux de la masse d'eau avec lui. Le temps de renouvellement de 29 h, est pourtant faible dans la masse d'eau (Figure 43). La concentration au point de suivi « Antifer ponton pétrolier », bien que prélevé à partir d'un ponton, suit la même décroissance que la concentration de la masse d'eau totale.

## 5.4 Secteur Pays de Caux

### 5.4.1 Evolution spatiale des temps de renouvellement

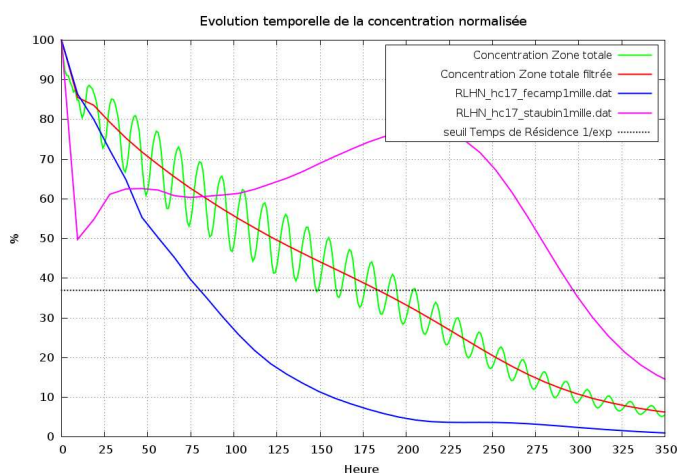
Les temps de renouvellements dans les masses d'eau du pays de Caux (HC17 et HC18) ne sont pas homogènes ; ils peuvent varier de 1 à 10 jours en remontant d'Ouest en Est (**Figure 44**). Les gradients des temps de renouvellement sont « linéaires » et sont bien le résultat de la lente dérive des eaux vers le Nord, et non d'une structure hydrodynamique causée par le relief (tourbillon, zone abritée). Ces deux masses d'eau sont particulièrement étirées, ce qui rend de tels écarts de temps de renouvellement d'Ouest en Est inévitables. Il est à noter que la dispersion est plus faible au Nord de la masse d'eau HC17 vers St Aubin.



**Figure 44** : Cartographie des temps de renouvellement dans les masses d'eau du Pays de Caux, avec une échelle à 10 jours.

## 5.4.2 Evolution temporelle des particules dissoutes

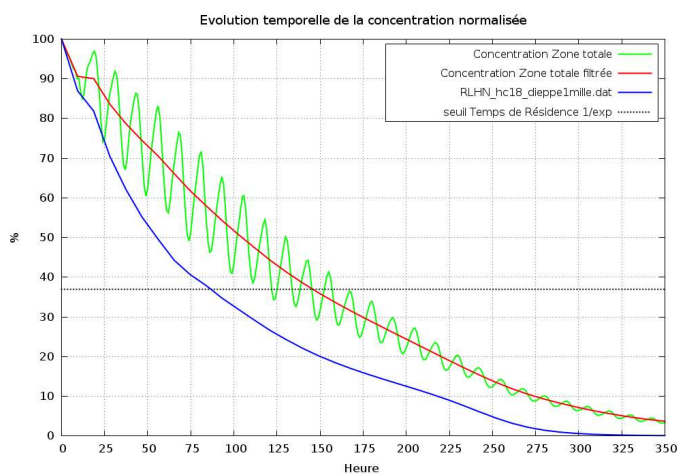
### HC17 – PAYS DE CAUX SUD



**Figure 45 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC17, et aux points « Fécamp 1 mille » et « St Aubin 1 mille ».

Le temps de renouvellement de la masse d'eau Pays de Caux Sud atteint 187 h (**Figure 45**). Le point de suivi « Fécamp 1 mille » semble se comporter de manière cohérente avec la masse d'eau, même si son temps est plus faible (82 h). Le traceur dissous au point « St Aubin 1 mille », situé près de la frontière Nord-Est de la masse d'eau, est d'abord rapidement diffusé hors de la masse d'eau sous l'effet de la marée descendante. Puis, dans un second temps, la concentration augmente du fait du transit des eaux du Sud de la masse d'eau vers le Nord le long de la bande côtière. Le temps de renouvellement s'y trouve fortement augmenté (proche de 300 h). Ce temps, d'environ 12 jours est finalement à rapprocher du temps nécessaire à une particule d'eau pour traverser la zone du Sud-Ouest au Nord-Est sans l'action du vent. Etant donné l'étendue de la masse d'eau, le point « St Aubin 1 mille » ne représente pas l'évolution globale. Pour un lâcher à la marée basse il n'y aurait pas de décroissance aussi rapide à « St Aubin 1 mille », mais à long terme, le temps de résidence aurait été équivalent.

### HC18 – PAYS DE CAUX NORD



**Figure 46 :** Evolution temporelle de la concentration normalisée de traceurs dissous dans la masse d'eau HC18, et au point « Dieppe 1 mille ».

La masse d'eau Pays de Caux Nord (HC18) est moins étirée que HC17, et le temps de renouvellement y est un peu plus faible (147 h) (**Figure 46**). Le point de suivi « Dieppe 1 mille », situé à l'Ouest de la masse d'eau, décroît logiquement plus vite sous l'action des courants résiduels de marée entraînant les eaux vers le Nord-Est, mais suit l'évolution globale de la concentration globale.

## 6 Discussion sur la représentativité des points de surveillance

Le choix de l'approche de la modélisation des temps de renouvellement permet de visualiser et de comparer la dispersion des traceurs dissous sur des secteurs différents, et à l'intérieur d'une même masse d'eau.

Pour rappel, ce temps de renouvellement désigne le temps nécessaire pour que la concentration initiale passe sous le seuil de 37% ( $1/e$ ), et repose sur le fait que la décroissance ait une forme exponentielle. Dans le cas présent, et pour rester cohérent, les **temps de renouvellement sont calculés sur la globalité de la masse d'eau, et en chaque point de surveillance du RHLN** à partir de l'instant du lâcher. Cette méthode a cependant ses limites dans la mesure où elle s'applique ici à des masses d'eau très ouvertes vers le large, la marée rentrant généralement par un côté et sortant de l'autre. Elle est plus communément appliquée à une configuration estuarienne ou en baie semi-ouverte. Il est également important de rappeler les trois hypothèses appliquées à ces simulations :

- Les **forçages de vent ne sont pas pris en compte**. En effet, il semble irréaliste de tester un vent schématisé sur plusieurs jours, mais son influence sur les courants réduirait considérablement le temps de renouvellement. Pour inclure la météo, il faudrait donc plutôt raisonner sur des scénarios réalistes de vent (estivaux, tempêtes, etc...) ;
- La **simulation démarre à la pleine mer** et se poursuit sur une marée réaliste alternant vive-eau et morte-eau dont les effets sur le temps de renouvellement sont bien entendu différents. L'heure du lâcher n'est pas décisive, mais des heures de lâchers différentes auraient pu être testées (BM, BM+3) pour réaliser une moyenne ;
- Le calcul du temps de renouvellement sur les cartes est effectué sur la **concentration évaluée à un intervalle fixe** correspondant à cycle de marée (12h24min) plutôt que faire une moyenne glissante sur 24 h.

**Les résultats montrent de fortes disparités spatiales de cet indicateur temporel.** Il est en général la conséquence directe de l'effet de la côte sur la marée, créant parfois des recirculations sous forme de tourbillons, des découvements importants de l'estran entraînant la masse d'eau vers le large ou au contraire des oscillations parallèles à la côte, freinant sa dilution.

Par ailleurs, **la taille de la masse d'eau influence grandement le temps de renouvellement**, à l'échelle de la masse d'eau, mais aussi à l'échelle de la maille. Dans le cas des masses d'eau du pays de Caux (HC17 et HC18), le temps de renouvellement de 10 jours à « St Aubin 1 mille » correspond plutôt au temps de transfert des eaux de la partie Sud-Ouest de la masse d'eau vers le Nord-Est.

Concernant les masses d'eau de transition, le débit mis dans le modèle correspond à un débit moyen, mais la simulation part sur une situation de panache (*i.e.* avec un « spin-up » de 20 jours) qui installe donc une stratification devant l'embouchure. **L'influence du débit est perceptible dans ces simulations (Seine, Orne), mais sa variabilité n'a pas été simulée.** Il est clair qu'en période de crue, le temps de renouvellement de la masse d'eau de Seine sera bien plus faible. Pour la masse d'eau du fond de la baie du Mont St Michel (HT05), sa surface est majoritairement située au-dessus du zéro des cartes marines, ce qui ne permet pas d'y appliquer le modèle.

En tenant compte des précédentes considérations, **la question de la représentativité des points de surveillance est complexe à résoudre à partir de ces seules données**, mais l'indicateur du rapport entre le temps de renouvellement en chaque point de suivi et celui de leur masse d'eau permet d'apporter des premiers éléments de réponse (**Tableau 3**).

**Tableau 3** : Synthèse des temps de renouvellement dans les masses d'eau et aux points de surveillance, et calcul de l'indicateur du temps de renouvellement au point de suivi vs dans la masse d'eau. Plus l'indicateur est proche de 1, plus le temps de renouvellement au point de suivi est proche de celui à l'échelle de la masse d'eau.

Masse d'eau	Temps de renouvellement de la masse d'eau ( $t_{ME}$ , heures)	Points de suivi RHLN	Temps de renouvellement au point de suivi ( $t_{point}$ , heures)	Indicateur $t_{point}/t_{ME}$
HC01	40	Chausey	58	1,45
HC02	520	Champeaux	600	1,15
HC03	88	Donville	20	0,2
		Ouest Lingreville	38	0,4
		Pointe Agon sud	65	0,7
		Pirou bergerie sud	94	1,1
		Denneville	160	1,8
HC04	36	FLAM-Dielette	16	0,4
HC60	15	Digue de Querqueville	40	2,7
HC07	12	Nord Ouest Levi	12	1,0
HC08	12	Réville 1 mille	12	1,0
HC09	26	Gougins	26	1,0
		La Hougue	80	3,1
HC10	36	Utah	110	3,1
		Roches de Grandcamp	12	0,3
HT06	21	Géfosse	65	3,1
HC11	140	Port en Bessin 1 mille	220	1,6
		Tracy-sur-Mer	84	0,6
HC12	55	Asnelles-Meuvinnes	68	1,2
HC13	37	St Aubin les Essarts	35	0,95
HC14	55	Luc 1 mille	60	1,1
		Ouistreham 1 mille	50	0,9
HT04	19	Estuaire de l'Orne	19	1,0
HC15	86	Cabourg	45	0,5
HT03	115	Seine 1	25	0,2
HC16	29	Antifer ponton pétrolier	29	1,0
HC17	187	Fécamp 1 mille	82	0,4
		St Aubin 1 mille	290	1,55
HC18	147	Dieppe 1 mille	88	0,6

Afin de pouvoir affiner la discussion sur la représentativité des points de surveillance du RHLN au sein des masses d'eau, les résultats des précédentes études basées sur la modélisation sont mobilisés : en 2005 à l'aide du modèle hydrodynamique advectif « Normandie » 2D à maille de 400 m (Le Goff *et al.*, 2005) ; et en 2015 à l'aide du modèle hydrodynamique advectif et dispersif « NORM » à maille de 200 m et sur 10 niveaux (Menet-Nédélec *et al.*, 2018).

## 6.1 Secteur Ouest Cotentin

**HC01 :** Au large de l'Ouest du Cotentin, le point « Chausey » est situé dans une masse d'eau assez homogène avec un temps de renouvellement court (< 4 jours) (**Figure 23**). L'évolution du temps de renouvellement était similaire sur ce point à celle à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 1,45) (**Figure 24** et **Tableau 3**). Les simulations de 2005 suggéraient un confinement des eaux dans cette masse d'eau par les courants malgré le fait qu'elle n'ait pas de frontière fermée. Aussi, la position plutôt centrale de ce point de suivi suggère qu'il doit relativement bien représenter la masse d'eau HC01 d'un point de vue hydrodynamique.

**HT05 :** Du fait de l'inapplicabilité du modèle dans cette masse d'eau du fait de sa bathymétrie, une simulation du temps de résidence au point « Tombelaine » a été effectuée en le comparant à celui de la masse d'eau HC02 voisine (**Figure 25**). Le temps de résidence des traceurs dissous est limité par le fait que la baie « se vide » à chaque marée. Cependant, ce point semble bien rendre de compte de la concentration globale au fond de la baie et peut donc être considéré comme représentatif d'un point de vue hydrodynamique.

**HC02 :** Les simulations de 2005 avaient mis en évidence les panaches de dessalure des trois cours d'eau débouchant dans HC02 *via* HT05 pour la *Sélune* et la *Sées*. Enfin, les simulations de 2015 avaient permis de confirmer que HC02 et le point « Champeaux » étaient particulièrement influencés par les apports des eaux du fond de la baie. D'après les trajectoires des bouées et simulations du nuage de particules, les eaux présentes au point « Champeaux » influencent celles du Nord-Est de la masse d'eau et transitent devant la pointe de Granville (*cf.* § 4.1.1). La circulation complexe dans la baie du Mont St Michel, et notamment la présence de recirculations, diminue l'effet de dilution des traceurs dissous et retarde leur évacuation de la masse d'eau (**Figure 23**). L'évolution de leur concentration dans le temps confirme ce résultat et montre que l'évolution au point « Champeaux » est similaire à celle à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 1,15) (**Figure 25** et **Tableau 3**). Ces résultats confirment la représentativité du point « Champeaux » pour la masse d'eau HC02 d'un point de vue hydrodynamique.

**HC03 :** Avec plus de 30 milles entre les frontières Sud et Nord, la masse d'eau HC03 est très étirée. Les trajectoires des bouées et simulations d'un nuage de particules confirment la prédominance des courants résiduels vers le Nord, excepté en morte-eau, où le vent devient le principal forçage (*cf.* § 4.1.2). Pour ce qui est des traceurs dissous, le temps de résidence est plus important au Nord qu'au Sud de la masse d'eau du fait des courants résiduels, et plus encore sous le Cap de Carteret qui retient quelques jours ces eaux (**Figure 23**). L'évolution temporelle de la concentration aux différents points de suivi, suggère que les points « Pointe Agon sud » et « Pirou bergerie sud » représenteraient le mieux l'évolution de la concentration à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 0,7 et 1,1 respectivement) (**Figure 26** et **Tableau 3**). Cependant, ces points sont situés sur des parcs conchylicoles qui peuvent avoir un impact sur la production primaire, et sont sous l'influence directe de panaches de cours d'eau (la *Sienne* et l'*Ay* respectivement). Les simulations de 2015 avaient aussi amené à la suggestion que les points « Ouest Lingreville » au Sud et « Denneville » au Nord permettraient de mieux rendre compte de la qualité globale de la masse d'eau et de l'impact des apports des 8 havres qui y débouchent, d'un point de vue hydrodynamique.

**HC04 :** Les données historiques dans cette masse d'eau ont confirmé son hydrodynamisme très marqué, qui est un facteur d'homogénéisation des eaux de surface et dans la colonne d'eau. Les simulations de 2005 avaient mis en évidence qu'au Sud les traceurs étaient très vite exportés au large, et qu'au Nord, ils oscillaient autour du raz Blanchard. Celles de 2015 avaient permis de montrer qu'une partie des traceurs lâchés au point « FLAM-Dielette » étaient rapidement sortis de la masse d'eau, mais qu'ils se dispersaient ensuite lentement. L'étude des temps de renouvellement suggère ici que la concentration en traceurs dissous décroît rapidement, et deux

fois plus vite au point « FLAM-Dielette » du fait de sa situation en bordure Ouest de la masse d'eau (rapport de 0,4) (**Figure 27** et **Tableau 3**). Il est cependant situé dans la zone la plus représentative de cette masse d'eau d'un point de vue hydrodynamique.

## 6.2 Secteur Nord Cotentin

**HC05** : Comme pour HC04, l'hydrodynamique est très importante dans cette masse d'eau, ce qui induit une homogénéisation des eaux de surface et de la colonne d'eau. Les simulations de 2005 puis en 2015 avaient montré que la masse d'eau HC05 était traversée par les eaux provenant de ses voisines HC60/HC61. L'étude des temps de renouvellement confirme que le temps de résidence dans la masse d'eau HC05 est très faible et homogène (< 1 jours) (**Figure 28**). Ces résultats permettent de consolider le fait qu'il n'est pas nécessaire de créer un point de surveillance dans cette masse d'eau dont les résultats de HC60/HC61 peuvent être extrapolés pour ce qui est des paramètres mesurés dans l'eau.

**HC60 / HC61** : Ces masses d'eau englobent la grande rade de Cherbourg (HC61) et son extérieur (HC60), et sont séparées par une digue. Les simulations de 2005 à partir de 3 points, avaient révélé des courants de marée complexes dans HC61 du fait des digues, zones portuaires, etc. créant des zones de confinement, ou au contraire des zones d'accélération des courants notamment dans les passes. Il avait donc été convenu que cette masse d'eau hétérogène, avec de nombreux apports ou rejets, serait suivie à partir du point « Digue de Querqueville » situé en bordure des deux masses d'eau, à l'exutoire de l'ensemble de la zone portuaire. Les simulations de 2015 paraissent confirmer la représentativité de ce point pour ces deux masses d'eau pour les paramètres mesurés dans l'eau. L'évolution de la concentration en traceurs dissous pour la masse d'eau HC61, confirme que les passes de la digue permettent une ventilation rapide de la masse d'eau, expliquant son temps de renouvellement très court (**Figure 28**). L'évolution de la concentration au point « Digue de Querqueville » est cohérente avec celle à l'échelle de la masse d'eau, avec une dispersion plus lente des traceurs car le point est en sortie des eaux de la rade (rapport de 2,7) (**Figure 29** et **Tableau 3**). Ce point paraît donc bien représentatif des masses d'eau HC60 et HC61 d'un point de vue hydrodynamique.

**HC07** : D'après les simulations de 2005, le Cap Lévi constitue une rupture courantologique entre l'Ouest (HC60) et l'Est (HC07) du Nord Cotentin, avec une inversion courantologique de la circulation résiduelle. Cette masse d'eau reste cependant très homogène du fait de l'hydrodynamisme très marqué dans ce secteur. En 2015, les simulations confirmaient cette inversion courantologique, avec une homogénéité dans l'évolution temporelle de traceurs à l'Ouest et à l'Est d'HC07. La bouée lâchée au niveau du point « Nord Ouest Lévi » a passé peu de temps dans la masse d'eau, et le nuage des traceurs simulés a mis en évidence une dispersion importante par vent fort (cf. § 4.1.3). Le temps de résidence à l'échelle de la masse d'eau est faible (< 48 h) (**Figure 28**), et la décroissance de la concentration du traceur dissous est très rapide (rapport de 1,0) (**Figure 30** et **Tableau 3**). L'ensemble de ces résultats suggère que le point « Nord Ouest Lévi » est représentatif de la masse d'eau HC07 d'un point de vue hydrodynamique.



### 6.3 Secteur Est Cotentin

**HC08 :** Les simulations de 2005 à partir du point « Réville 1 mille » avaient permis de mettre en évidence l'hydrodynamisme lié à la présence du gyre de Barfleur à proximité, facteur d'homogénéisation de la masse d'eau. En 2015, des simulations à partir de la pointe de Saire et au centre de HC08 montraient l'influence d'une résiduelle de courant de marée très marquée orientée Sud / Nord, et qu'une plus grande quantité de traceurs restait dans la masse d'eau lorsqu'ils étaient lâchés au Sud de celle-ci. Les bouées lâchées et les simulations au Sud et au Nord d'HC08 le même jour, y ont passé très peu de temps car elles se sont éloignées de la côte vers le Nord en oscillant (cf. § 4.1.4). Comme dans toutes les masses d'eau à forte hydrodynamisme, le temps de résidence dans la masse d'eau paraît faible (< 48 h) (**Figure 28**), et la décroissance de la concentration du traceurs dissous est très rapide (rapport de 1,0) (**Figure 31** et **Tableau 3**). L'ensemble de ces résultats suggère que le point « Réville 1 mille » est représentatif de la masse d'eau HC08, d'un point de vue hydrodynamique.

**HC09 :** Les simulations de 2005 avaient permis de montrer que la masse d'eau est influencée par les eaux provenant du Sud par les courants résiduels de marée, et que l'anse du Cul du Loup forme un réceptacle où convergent les eaux de l'Est Cotentin, avec une concentration probable des apports des bassins versants locaux. Les lâchers de bouées et simulations de traceurs particuliers effectués dans HC10 et HT06 montrent que HC09 est bien traversée par les eaux provenant de la baie des Veys et passent par le point « Gougins » (cf. § 4.1.5, et ci-dessous). La cartographie des temps de résidence montre l'hétérogénéité de la masse d'eau, avec au Sud un temps < 2 jours et au Nord dans l'anse un temps d'environ 2-3 jours (**Figure 28**). L'évolution temporelle de la concentration des traceurs dissous confirme que le point « Gougins » paraît plus représentatif de l'ensemble de la masse d'eau (rapport de 1,0), alors qu'au point « La Hougue » les traceurs restent concentrés plus longtemps (rapport de 3,1) (**Figure 32** et **Tableau 3**). La représentativité de ces deux points d'un point de vue hydrodynamique dépend donc de l'objectif du suivi : le point « Gougins » serait plus représentatif de l'ensemble de la masse d'eau, et le point « La Hougue » serait intéressant pour caractériser les apports locaux.

**HT06 / HC10 :** Ce secteur est complexe à modéliser notamment du fait que la grande majorité de la masse d'eau HT06 « se vide » à marée basse. Les simulations de 2005 avaient montré que les courants résiduels de la marée sont orientés vers le Nord-Ouest, en longeant la côte Est Cotentin, et influençant donc les eaux de HC09. De plus, les résultats suggéraient que le point « Roches de Grandcamp » serait plus représentatif de l'Est de la masse d'eau HC10, et que, quel que soit l'orientation des vents dominants, les eaux du point « Géfosse » influencent l'Ouest de la baie des Veys. Les lâchers de bouées simultanés et simulations à l'Est et Ouest de HT06 confirment les résultats de 2004, les eaux de l'Est de la baie influençant celles de l'Ouest, mais pas inversement (cf. § 4.1.5). Par vent de Nord-Est, les bouées et particules ne passent pas par l'Est de HC10. Et une bouée et des particules lâchées à « Roches de Grandcamp » suivent la circulation vers le Nord-Ouest. Le temps de résidence dans HT06 est court (< 2 jours) (**Figure 28**), mais la décroissance de la concentration à « Géfosse » est plus lente qu'à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 3,1) probablement du fait que le point est situé dans un chenal qui reste généralement rempli à marée basse (**Figure 33** et **Tableau 3**). Dans HC10, le temps de résidence est un peu plus long, et l'évolution des concentrations aux deux points de suivi est très différente (**Figure 34** et **Tableau 3**). En effet, la concentration reste plus importante plus longtemps au point « Utah » situé à l'Ouest (rapport 3,1) qu'au point « Roches de Grandcamp » situé à l'Est (rapport de 0,3). Ceci peut s'expliquer par l'influence de la marée plus forte à « Roches de Grandcamp » pour lequel les eaux sont évacuées vers l'Ouest, qu'au point « Utah » qui est sous l'influence de la dérive des eaux de l'Est vers l'Ouest dans HC10. Sur cette base, le point « Géfosse » paraît donc bien représenter la masse d'eau HT06 d'un point de vue hydrodynamique. Il est difficile de statuer sur les deux points d'HC10, qui paraissent représenter des aspects complémentaires du fonctionnement de la baie.

## 6.4 Secteur Calvados

**HC11 :** Les simulations de 2005 avaient permis d'identifier des courants de marée résiduels orientés de l'Est vers l'Ouest, parallèlement à la côte. En 2015, les simulations sur un point à l'Est d'HC11 (correspondant au point « Tracy-sur-Mer » suivi de 2016 à 2018) et au point « Port-en-Bessin 1 mille » montraient une diffusion vers l'Est avec un temps de résidence plus important à Port-en-Bessin qu'à l'Est. Les lâchers de bouées simultanés et simulations sur ces deux points ont montré des trajectoires identiques avec une sortie rapide de la masse d'eau vers le Nord par vent de Sud (cf. § 4.1.6). Par contre, par vent de Nord-Est, les lâchers à « Port-en-Bessin 1 mille » restent dans la masse d'eau et dérivent vers l'Ouest, jusqu'à l'Est de HC10. La cartographie des temps de résidence conforte la circulation parallèle et le confinement des traceurs à la côte (**Figure 28**). Leur concentration apparaît plus importante plus longtemps, mais cohérente avec celle à l'échelle de la masse d'eau, au point « Port-en-Bessin 1 mille » qu'à « Tracy-sur-Mer » (rapport de 1,6 et 0,6 respectivement), où les traceurs ont été très vite dilués à la première marée (**Figure 35** et **Tableau 3**). Le point « Port-en-Bessin 1 mille » paraît donc mieux représenter l'évolution de la concentration dans la masse d'eau HC11, d'un point de vue hydrodynamique.

**HC12 / HC13 :** Les simulations de 2005 avaient permis de mettre en évidence la courantologie comparable dans ces deux masses d'eau, avec des courants résiduels de marée orientés de l'Est vers l'Ouest, puis une dérive vers le large en HC12. En 2015, la simulation au point « Asnelles-Meuvoines » avait montré le plus grand temps de résidence. Dans HC13, les simulations à un point proche de la côte et au point « St Aubin les Essarts » plus au large, montraient une plus forte concentration des traceurs près de la côte, mais avec un même temps de résidence aux deux points. Du fait de la présence du platier rocheux, le point de suivi RHLN paraissait donc bien le plus adapté. Les lâchers de bouées et simulations au point « Asnelles-Meuvoines » par vent de Sud, avaient permis d'observer leur dérive rapide au large de la masse d'eau HC12 (cf. § 4.1.7). Par contre, par vent de Nord-Est, des lâchers effectués au point « St Aubin les Essarts » (HC13) restent plaqués à la côte et dérivent *via* HC12 jusqu'à l'Est d'HC11. La cartographie des temps de résidence montre que celui-ci paraît inférieur à 4,5 jours, avec des temps plus longs au centre de ces masses d'eau (**Figure 36**). En effet, l'évolution de la concentration des traceurs dissous aux deux points respectifs de suivi de HC12 et HC13 suggère qu'ils permettent de bien rendre compte de celle à l'échelle de leur masse d'eau (rapport de 1,2 et 0,95 respectivement) (**Figure 37**, **Figure 38** et **Tableau 3**). De par leur position assez centrale, les points « Asnelles-Meuvoines » et « St Aubin les Essarts » paraissent donc bien représenter les masses d'eau HC12 et HC13 respectivement, d'un point de vue hydrodynamique.

**HT04 / HC14 :** Les simulations de 2005 avaient permis de mettre en évidence la dérive des particules avec les courants résiduels de marée orientés de l'Est vers l'Ouest parallèlement à la côte, et influençant HC13. Aucun lâcher de bouées et simulation associée n'ont été effectués dans ce secteur. La cartographie des temps de résidence montre que ceux-ci augmentent un peu à l'Est de la masse d'eau HC14 (jusqu'à 3-4 jours) du fait de l'effet de la marée, mais qu'ils sont faibles aussi dans HT04 (**Figure 36**). Dans HC14, l'évolution de la concentration des traceurs dissous aux deux points qui étaient suivis « Luc 1 mille » (arrêté en 2019) et « Ouistreham 1 mille » est très cohérente avec celle à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 1,1 et 0,9 respectivement) (**Figure 39** et **Tableau 3**), et de même pour le point « Estuaire de l'Orne » pour HT04 (**Figure 40**). Ces résultats suggèrent que ces points de suivi RHLN sont bien représentatifs de leur masse d'eau respective, d'un point de vue hydrodynamique.

**HC15 :** Les simulations de 2005 suggéraient que l'estuaire de l'Orne constitue une zone de rupture dans la circulation résiduelle de marée. Au point « Cabourg », celles-ci montraient des excursions de marée très courtes, et une résiduelle de faible ampleur dirigée vers le Nord-Ouest. De plus, celui-ci paraissait sur la trajectoire d'une particule lâchée à l'Est, à la frontière avec HT03. Les lâchers de bouées simultanément au point « Cabourg » et à l'Est de HC15 sont rapidement sorties de la masse d'eau pour dériver au large vers l'Ouest et revenir dans HC13 par vent de Nord-Est (cf. § 4.1.8). Les simulations n'avaient pas réussi à reproduire ce schéma. Comme pour HC14, la cartographie des temps de résidence montre que ceux-ci augmentent un peu à l'Est de la masse d'eau (jusqu'à 3-4 jours) du fait de l'effet de la marée (**Figure 36**). En effet, l'évolution de la concentration des traceurs dissous montrent que celle-ci diminue plus rapidement au point « Cabourg » qu'à l'échelle de HC15 (ratio de 0,5) (**Figure 41** et **Tableau 3**). Positionné plus à l'Ouest par rapport au centre de la masse d'eau, le glissement des eaux vers le Nord-Est a tendance à renouveler localement l'eau plus rapidement. Le positionnement d'un point de suivi à l'Est de la masse d'eau aurait vraisemblablement une représentativité plus forte des apports de HT03.

## 6.5 Secteur Estuaire de Seine

**HT03 :** Les simulations de 2005 suggéraient que des particules lâchées légèrement au Sud-Ouest du Havre sortaient peu de la masse d'eau, par contre, un point au Sud de l'estuaire était orienté vers l'Ouest parallèlement à la côte, traversant ainsi HC15. En 2015, une simulation effectuée à partir du point « Seine-1 » dérivait vers le Nord le long de la côte, en traversant HC16 après avoir stagné en face du port du Havre. Des lâchers de bouées simultanément et leurs simulations au centre et au Sud de HT03 par des vents d'abord de Sud-Ouest, puis de Nord-Ouest, ont confirmé cette circulation dans la masse d'eau avant de prendre la direction du Nord-Est (cf. § 4.1.9). La cartographie des temps de résidence met en évidence l'hétérogénéité de la masse d'eau, sachant que les temps sont plus longs si le débit de la Seine n'est pas suffisant ou si les vents sont nuls, comme appliqué ici dans le modèle (**Figure 36**). Le point « Seine-1 » étant situé au Nord-Ouest de la masse d'eau, la concentration en traceurs dissous est logiquement plus rapidement plus faible, mais son évolution reste cohérente avec celle de la masse d'eau (rapport de 0,2) (**Figure 42** et **Tableau 3**). Ces résultats suggèrent que le point « Seine-1 » peut être considéré comme représentatif de HT03 d'un point de vue hydrodynamique.

**HC16 :** Le point « Antifer ponton pétrolier » est situé du côté Sud du ponton à environ 1 mille nautique de la côte. La simulation de 2005, confortée en 2015, montrait une trajectoire confinée dans le gyre généré par la digue d'Antifer, qui finissait par osciller de part et d'autre de celle-ci en se décalant un peu vers l'Ouest et le Nord. La bouée lâchée à l'extérieur de la digue par un vent fort qui a changé de direction plusieurs fois, a passé très peu de temps dans la masse d'eau et a dérivé au large sur une longue distance (cf. § 4.1.9). La cartographie des temps de résidence montre que les eaux sont rapidement dispersées (1-2 jours maximum) dans toute la masse d'eau (**Figure 36**). Le temps de renouvellement y est donc faible, et l'évolution de la concentration en traceurs dissous est similaire entre celle du point « Antifer ponton pétrolier » et à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 1,0) (**Figure 43** et **Tableau 3**). Ces résultats suggèrent donc que le point « Antifer ponton pétrolier » peut être considéré comme représentatif de HC16 d'un point de vue hydrodynamique.

## 6.6 Secteur Pays de Caux

**HC17 :** Cette masse d'eau est l'une des plus étendue du littoral normand. La simulation de 2005 au point « Fécamp 1 mille » a mis en évidence des courants résiduels de marée orientés vers le Sud-Ouest parallèles à la côte. En 2015, deux autres simulations ont été réalisées : à un point central en bordure extérieure de la masse d'eau, et un point au Nord-Est (correspondant au point « St Aubin 1 mille » suivi de 2016 à 2018). Les temps de résidence étaient similaires aux deux points en durée, mais les excursions de marée faisaient évoluer fortement les concentrations du traceur au Nord-Est. La cartographie des temps de résidence dans HC17 montre une grande hétérogénéité, variant de 1 à 10 jours au Sud-Ouest et Nord-Est respectivement (**Figure 44**). Ce gradient linéaire a été attribué à la lente dérive des eaux vers le Nord. Ceci expliquerait la décroissance de la concentration en traceurs dissous, qui est plus rapide à « Fécamp 1 mille » (rapport de 0,4) qu'à l'échelle de la masse d'eau (**Figure 45** et **Tableau 3**). L'évolution au point « St Aubin 1 mille » peut être due à la diffusion rapide des traceurs hors de la masse d'eau du fait des excursions de marée suivie d'une augmentation de la concentration grâce au transit des eaux du Sud vers le Nord de la masse d'eau. Ces résultats suggèrent donc que le point « Fécamp 1 mille » peut être considéré comme représentatif de HC17 d'un point de vue hydrodynamique.

**HC18 :** La simulation de 2005 avait été effectuée à partir d'un point situé légèrement au large et au centre de la masse d'eau. Elle avait montré une trajectoire suivant l'orientation de la résiduelle de marée vers le Nord-Est. La cartographie des temps de résidence montre une hétérogénéité, variant de 1 à 10 jours au Sud-Ouest et Nord-Est respectivement, comme pour HC17 (**Figure 44**). Ce gradient linéaire a aussi été attribué à la lente dérive des eaux vers le Nord, ce qui expliquerait que la décroissance de la concentration en traceurs dissous à « Dieppe 1 mille » soit un peu plus rapide qu'à l'échelle de la masse d'eau (rapport de 0,6) (**Figure 46** et **Tableau 3**). Ces résultats suggèrent donc que le point « Dieppe 1 mille » peut être considéré comme représentatif de HC18 d'un point de vue hydrodynamique.

## 7 Conclusion

L'étude RESUME constituait une suite logique aux différents travaux de modélisation menés par le LER/N, que ce soit en 2005 pour la définition de la stratégie de surveillance pérenne du RHLN dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), ou en 2015 pour la révision de cette stratégie pour le programme 2016-2021.

Pour ce faire, le LER/N a mobilisé ses propres moyens nautiques et ses pilotes afin de réaliser les opérations de déploiement et de récupération des bouées dérivantes. Ces missions étaient complexes par la nécessité de combiner plusieurs contraintes de navigation, de planification (horaires, vents appropriés, conditions météorologiques), et de gestion d'imprévus (échouages de bouées). Ce travail a permis de réaliser 27 lâchers de bouées sur 13 masses d'eau côtières ou de transition du littoral normand, qui ont totalisé 157 jours de dérive et près de 7 000 km de distance parcourue.

L'étape préliminaire de calibration du modèle NORM (MARS-3D) a été effectuée en comparant certaines trajectoires obtenues avec le modèle en fonction de différents forçages (météorologie, coefficient d'entraînement par le vent, hauteur des vagues, etc.).

La deuxième partie de l'étude a consisté à comparer les trajectoires réelles des bouées avec des simulations de traceurs particuliers lâchés dans les mêmes conditions de forçage que les bouées. Les principaux résultats obtenus montraient que la durée optimale pour la comparaison était d'une semaine, et que les trajectoires réelles vs simulées obtenues étaient généralement satisfaisantes. Quelques problèmes ont cependant été soulevés pour les simulations dans les masses d'eau de transition du fait de leur faible profondeur, et du fait que certaines se découvrent presque complètement à marée basse (cas de HT05 et HT06). En outre, le modèle ne s'est pas toujours révélé très fiable dans la partie Ouest de la baie de Seine par vents de Nord-Est, et le modèle a globalement montré des difficultés à pouvoir correctement prendre en compte le forçage du vent. Par contre, celui-ci a permis de mieux caractériser la dispersion des traceurs. Une amélioration pourrait être apportée en utilisant une meilleure résolution du modèle dans le Sud de la baie de Seine.

La troisième partie de l'étude a permis de simuler des traceurs dissous à l'échelle des masses d'eau et à partir des points actuels de suivi du RHLN. Des cartes des temps de résidence de ces traceurs par masses d'eau, et l'évolution temporelle de leur concentration ont permis de faire des comparaisons entre les points de suivi et la masse d'eau entière. Les résultats ont montré de fortes disparités spatiales de l'indicateur du temps de renouvellement, et ont mis en évidence l'influence de la taille des masses d'eau sur cet indicateur. En outre, l'influence du débit est manifeste dans les estuaires, mais leur variabilité n'a pas été simulée. Enfin, une discussion a été menée sur la représentativité des points de suivi RHLN au regard de leur masse d'eau respective. Il s'avère que les points du RHLN paraissent globalement bien les représenter d'un point de vue hydrodynamique. Il apparaît en général une meilleure cohérence lorsque le point est situé au centre de la masse d'eau.

Aussi, afin de finaliser la réflexion sur la représentativité des points de suivis, il serait souhaitable d'effectuer une étude statistique sur les différents paramètres mesurés dans le RHLN entre points voisins.

## 8 Références

Jouon A, Douillet P, Ouillon S, Fraunie P (2006). **Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model.** *Continental Shelf Research*, 26(12-13), 1395-1415. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.11.014>

Lazure P, Dumas F (2008). **An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS).** *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>

Le Gendre R, Morin J, Maheux F, Fournier F, Simon B, Cochard M-L, Pierre-Duplessix O, Dumas F, Harmel B, Paul C, Riou P (2014). **DILEMES - DIspersion LarvairE de Mytilus Edulis en baie de Seine. Rapport final.** <https://archimer.ifremer.fr/doc/00188/29916/>

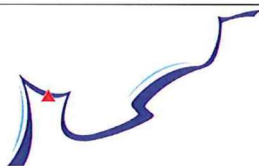
Le Goff R, Riou P, Daniel A, Etourneau C, Maheux F, Pierre-Duplessix O, Justome V, Jacqueline F, Fiant L, Françoise S, Lampert L, Girard F, Ropert M (2005). **Réseau Hydrologique Littoral Normand (RHLN) : Rapport 2005 Cycles hydrobiologiques annuels 2001-2004, évaluation des niveaux trophiques et proposition de réseau hydrologique pérenne de suivi de la qualité des masses d'eau DCE.** RST.LERN/05.09/PB. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00087/19785/>

Menet-Nédélec F, Riou P, Rabiller E, Courtay G, Fontaine B, Françoise S, Jacqueline F, Lesaulnier N, Louis F, Maheux F, Pierre-Duplessix O, Schapira M, Simon B, Dumas F, Le Gendre R (2018). **Réseau Hydrologique Littoral Normand (RHLN). Suivi 2015.** ODE/LERN/18-01. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00426/53754/>

## 9 Annexe

### AUTORISATIONS D'IMMERSION DES BOUEES DERIVANTES

 Liberté • Égalité • Fraternité RÉPUBLIQUE FRANÇAISE		<b>PRÉFECTURE MARITIME DE LA MANCHE ET DE LA MER DU NORD</b>	
		<b>PREMAR MANCHE</b> <b>50115 CHERBOURG-OCTEVILLE CEDEX</b>	
T É L É C O I P I E			
<b>ORIGINE</b>	EV2 Sylvain Traversa <i>Division « action de l'Etat en mer »</i>	<b>☎</b> : 02.33.92.52.52	Fax : 02.33.92.59.26
<b>DESTINATAIRE</b>	IFREMER <i>A l'attention de M. Frank Maheux</i>	<a href="mailto:Frank.Maheux@ifremer.fr">Frank.Maheux@ifremer.fr</a>	
<b>COPIES</b>	CROSS Jobourg DML Calvados DML Manche DML Seine-Maritime SHOM  OPL/COM – OPL/INFONAUT – AEM/RESMAR 2 – SEC/AEM	<a href="mailto:jobourg@mrccfr.eu">jobourg@mrccfr.eu</a> <a href="mailto:ddtm.sml@calvados.gouv.fr">ddtm.sml@calvados.gouv.fr</a> <a href="mailto:ddam-manche@developpement-durable.gouv.fr">ddam-manche@developpement-durable.gouv.fr</a> <a href="mailto:ddtm-dml-aimlp@seine-maritime.gouv.fr">ddtm-dml-aimlp@seine-maritime.gouv.fr</a> <a href="mailto:shom-sec@shom.fr">shom-sec@shom.fr</a>  <a href="mailto:Com_cherbourg@marine.defense.gouv.fr">Com_cherbourg@marine.defense.gouv.fr</a>	
<input type="checkbox"/> CD <input type="checkbox"/> DR <input checked="" type="checkbox"/> NP		Nombres de pages :      2 (y compris celle-ci)	
N°      PREMAR MANCHE/AEM/NP			
<b>OBJET</b>	: Mission scientifique IFREMER – prorogation d'autorisation		
<b>RÉFÉRENCE</b>	:		
<p>J'accuse réception de votre demande de prorogation de votre mission scientifique de lâchers de bouées dérivantes le long des côtes du Calvados.</p> <p>Sous réserve de se conformer aux règles de navigation en vigueur et aux dispositions réglementaires en matière d'armement du navire et d'embarquement des passagers, j'autorise les navires « <i>Delphy</i> », « <i>Parce que</i> » et « <i>Hydrophone</i> » à débiter cette campagne de recherche scientifique pour la zone de compétence relevant du préfet maritime de la Manche et de la mer du Nord.</p>			



PREMAR MANCHE  
50115 CHERBOURG-OCTEVILLE CEDEX

## T É L É C O P I E

Un préavis de 24 heures ouvrables avant le début du mouillage des bouées devra parvenir aux adresses suivantes :

- au **Secrétariat de la division « action de l'État en mer »**  
Fax : 02.33.92.59.26      mël : sec.aem@premar-manche.gouv.fr
- au **Centre des Opérations Maritimes de Cherbourg**  
Fax : 02.33.92.60.77      mël : com\_cherbourg@marine.defense.gouv.fr
- ainsi qu'au **CROSS Jobourg**  
Fax : 02.33.52.71.72      mël : jobourg@mrc CFR.eu

Une fois les opérations engagées, les commandants des navires « *Delphy* », « *Parce que* » et « *Hydrophone* » devront signaler le début et la fin de ses opérations aux mêmes adresses. Il en sera de même pour l'opération de récupération des bouées à la fin de votre campagne d'étude.

Toute modification ou annulation des opérations devra être signalée à la préfecture maritime de la Manche et de la mer du Nord.

Le préfet maritime de la Manche et de la mer du Nord  
par délégation, l'administrateur en chef de 1<sup>ère</sup> classe des affaires maritimes  
Daniel Le Direach  
adjoint pour l'« action de l'État en mer »

